

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
RAKENNUS- JA MAANMITTAUSTEKNIIKAN OSASTO  
RAKENNETEKNIIKAN LAITOS  
TALONRAKENNUSTEKNIikka

JANNE SIHVONEN

PUUN SOLUKKORAKENTEESEEN PERUSTUVA  
KOSTEUDEN SIIRTYMISEN MALLINTAMINEN



*Diplomityö, joka on opinnäytteenä  
jätetty tarkastettavaksi diplomi-  
insinöörin tutkintoa varten  
Espoossa 31.10.1994.*

*Työn valvoja:*

*Prof. Pekka Kanerva*

*Työn ohjaaja:*

*Tekn.lis. Ilmari Absetz*

Tekijä: **Janne Sihvonon**

Diplomityö: **Puun solukkorakenteeseen perustuva kosteuden siirtymisen mallintaminen**

Päivämäärä: **31.10.1994**

Sivumäärä: **128+41**

Professuuri: **Talonrakennustekniikka**

Koodi: **Rak-43**

Valvoja: **Professori Pekka Kanerva**

Ohjaaja: **Tekniikan lisensiaatti Ilmari Absetz**

Tutkimuksessa mallinnettiin perustutkimuksen omaisesti diffuusiota kennomaisessa puun solukkorakenteessa. Solukko koostuu ontoista trakeideista, soluseinistä ja huokosaukoista. Ensimmäisenä tavoitteena oli vahvistaa hypoteesina ollut puun heterogeenisesta solurakenteesta aiheutuva makroskooppisen diffuusion poikkeaminen Fickin laeista. Tutkimuksen soveltavassa osuudessa oli tavoitteena saada uutta tietoa liiman ja puun rajapinnan kosteuskäyttäytymisestä käyttäen apuna kosteuden siirtymisen solukkotason mallintamista.

Tutkimusmenetelmänä käytettiin simuloituja sorptio- ja kuppikokeita, joita kokeellisella puolella käytetään diffuusiokertoimen määrittämiseen. Simulointimenetelmänä käytettiin elementtimenetelmään perustuvan tietokoneohjelma NISA:n (Numerically Integrated Elements for System Analysis) lämmönsiirtymisen analogiaan perustuvia analyysejä. Solukkomallien geometria ja kosteudensiirtymisreitit karakterisoitiin kirjallisuudesta etsittyjen solujen anatomiatietojen, mikroskooppikuvien analysoinnin ja kevät- ja kesäpuun huokosjakaumamittauksen avulla. Käytetyt materiaaliominaisuudet perustuvat kirjallisuudesta saatuihin laboratoriokoetuloksiin.

Kosteudensiirtymisreitillä *soluontelo* - *huokosaukko* kosteus siirtyy nopeasti syvemmällä rakenteessa sijaitseviin kosteuskapasitiivisiin soluseiniin. Aina kun kosteus siirtyy huokosaukon kautta soluseinän takana olevaan soluonteloon, kosteuden soluseinään sitoutumisen efektiivinen pinta-ala kasvaa. Epästationaarisessa diffuusiassa kosteuspitoisuuserot tasoittuvat solukkorakenteen sisällä mielivaltaisista suunnista, vaikka koko rakenteen osalta kosteuspitoisuuserojen tasoittumisen aiheuttaa yksidimensioinen gradientti.

Adsorption alussa kosteuden siirtyminen soluonteloihin nopeutuu pinnan rikkonaisen solukon aiheuttaman ominaispinta-alan kasvun vaikutuksen verran. Kosteuden siirtymistä solukkorakenteessa nopeuttaa huokosaukkojen lukumäärän kasvaminen. Kosteuden sitoutumista vastaavasti hidastaa soluseinän paksuuden kasvaminen. Erityisesti Fickin laeista poikkeava diffuusio korostuu malleilla, joilla on samanaikaisesti pieni puolipaksuus ja suuri tiheys sekä suuret efektiiviset huokosaukot. Diffuusiokerrointen ja kosteuskapasiteettien suuret erot huokosilmassa ja soluseinissä sekä rinnakkaiset kosteudensiirtymisreitit aiheuttavat Fickin laeista poikkeavaa kosteuskäyttäytymistä. Puolipaksuuden kasvaessa kosteuspitoisuuserojen tasoittumiseen kuluva aika kasvaa. Tällöin viivästyneen epästationaarisen kosteuden sitoutumisen osuus ja pintavastuksen kosteuden siirtämistä hidastava osuus kokonaisajasta pienenee. Kun puolipaksuus kasvaa, stationaarinen ja epästationaarinen diffuusio lähestyvät toisiaan ja diffuusio alkaa yhä enemmän muistuttaa Fickin lakien mukaista kosteuskäyttäytymistä.

Puuvilutuotteiden liimasaumassa solukossa oleva liima tukkii huokosaukot ja täyttää soluontelot kokonaan tai osittain. Kun kosteus kohtaa puun ja liiman rajakerroksen, kosteuspitoisuuserot kasvavat jyrkästi. Liiman sisällä kosteus siirtyy nopeasti, mutta liiman suuren kosteuskapasiteetin vuoksi kosteuspitoisuuserojen tasoittuminen on hidasta. Kosteuspitoisuuserojen tasoittumisen nopeuden määrää liimatäytteen solukon alueella olevien soluseinien hidas kosteudensiirtokyky ja liiman suuri kosteudensitomiskyky. Kohtisuoraan liimasaumaa vastaan, liimalla on erittäin epästationaarisessa tapauksessa tehokas vaikkakin kosteuskapasitiivinen kosteuden siirtymistä hidastava vaikutus.

Avainsanat: puu, diffuusio, stationaarinen, solukkorakenne, kosteudensiirtymisreitti, kosteuskapasiteetti, epästationaarinen, Fickin laeista poikkeava



Author:	<b>Janne Sihvonon</b>	
Thesis:	<b>Modelling of Moisture Transport Based on Cellular Structure of Wood</b>	
Date:	<b>31.10.1994</b>	Number of pages: <b>128+41</b>
Professorship:	<b>Structural Engineering and Building Physics</b>	Code: <b>Rak-43</b>
Supervisor:	<b>Professor Pekka Kanerva</b>	
Instructor:	<b>Ilmari Absetz, Licentiate of technology</b>	

In the first part of the research, diffusivity in cellular structure of conifer wood was modelled. The cellular structure consist of tracheids, cell walls and pit apertures. The main aim was to show connection with the heterogeneous cellular structure of wood to non-Fickian moisture diffusion phenomena reported by several researchers. In the applied part of the research, the aim was to find new knowledge of diffusion in the interface of glue and wood where cellular structure is locally filled by glue.

The research methods used was simulation of sorption and cup tests. These test methods are used in laboratory to determine diffusion coefficients. The simulation method was based on the analogy between heat and moisture transport. Analyses of the heat transfer calculation program NISA (Numerically Integrated Elements for System Analysis) were used in moisture calculations. Geometry in cellular structure of wood, diffusion routes and material properties were based on knowledge of tracheid anatomy found in literature, analysis of microscopy images and pore size distributions measurements with mercury porosimetry method for early wood and late wood.

In the diffusion route *cell lumen – pit aperture*, moisture transport occurs fast to moisture capacitive cell walls, also in the deeper part of the cellular structure. Always, when moisture transports through a pit aperture to next cell lumen, effective area of moisture sorption to cell wall grows larger as the sorption occurs also from behind the cell wall. In transient case diffusivity of cellular structure, the moisture concentration differences equilibrate into arbitrary directions; although considering the whole structure, the equilibration of moisture concentration differences is caused by a one dimensional gradient.

In the beginning of the adsorption, moisture transport process gets faster as the characteristic surface area becomes larger due to the ragged cellular structure at the boundary. The moisture transport rate increases in the cellular structure of wood, when the number of pit apertures increases. Correspondingly, moisture sorption is slower when cell wall thickness increases. The non-Fickian behaviour is emphasised especially in those models that have a small half-thickness, high density and large effective pit apertures at the same time. In present model, the non-Fickian behaviour is caused by simultaneously acting parallel diffusion routes and remarkable differences in diffusion coefficients and moisture capacities between the cell walls and the cell lumens. When the half-thickness increases, it takes more time to equilibrate the moisture concentration differences. In this case, the delayed moisture storage of the transient case and the surface emissivity's effect take a smaller proportion of the total sorption time. When the half-thickness increases, the steady state and the transient case results get closer to each other, and more consistently resemble the moisture behaviour described by Fick's laws.

In the glue line of wood composite products, the glue located in the cellular structure blocks out pit apertures and cell lumens either partly or completely. Moisture concentration differences increase rapidly in the frontier area of the glue and the cellular structure of wood. The moisture transport is fast in glue, but because of the high moisture capacity, the moisture gradient equilibrates slowly. Cell walls' slow moisture transfer capacity and glue's high moisture storage capacity determine the time needed for the equilibration of the moisture concentrations in the glue line area. In direction perpendicular to the glue line, the effect of glue on decreasing moisture transport is very strong, but of moisture capacitive by nature.

Key words: wood, diffusivity, steady state, cellular structure, diffusion routes moisture capacity, transient case, non-Fickian behaviour

# SISÄLLYSLUETTELO

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS

## SISÄLLYSLUETTELO

## SYMBOLILUETTELO

## ALKULAUSE

1	JOHDANTO.....	12
2	KOSTEUDEN SIIRTYMISEN MALLINTAMISEEN VAIKUTTAVA PUUN SOLURAKENNE.....	16
2.1	Trakeidit.....	19
2.2	Rengashuokokset.....	22
2.3	Margo.....	25
3	NISA:N LÄMMÖNSIIRTOANALYYSIN SOVELTAMINEN KOSTEUDEN SIIRTYMISEN LASKENTAAN.....	28
3.1	Lämmön ja kosteuden siirtymisen analyysit.....	28
3.2	Laskenta-analyysi.....	32
3.3	Laskennan reunaehtojen tulkinta kosteyslaskennassa .....	33
3.4	Elementtityyppi.....	35
3.5	Kosteuskapasiteetti .....	36
3.6	Soluseinän diffuusiokerroin.....	37
3.7	Pinnansiirtokerroin.....	39
3.8	Diffuusiokertoimen laskenta.....	39
4	NISA:N LÄMMÖNSIIRTOANALYYSIN VERTAILU MUIHIN RATKAISUMENETELMIIN .....	41
4.1	Vertailevat laskennat ja laskentamenetelmät.....	42
4.1.1	<i>Analyttinen ratkaisu .....</i>	43
4.1.2	<i>Turbo pascal -ohjelma KOST1.....</i>	45



4.1.3	<i>Elementtihojelma NISA</i> .....	46
4.2	Laskennan lähtötiedot ja tulosten verifiointi.....	48
4.2.1	<i>Pinnansiirtokertoimen vaikutus</i> .....	52
4.2.2	<i>Kosteusvirran suuruuden luotettavuus</i> .....	54
5	KOSTEUDEN SIIRTYMISEN LASKENTAMALLIEN MUODOSTAMINEN .....	58
5.1	Laskentamallien geometriset muodot.....	59
5.1.1	<i>Kosteuden diffuusioreitit solutasolla</i> .....	60
5.1.2	<i>Geometrian vaikutus kosteuden siirtymisen reitin pituuteen</i> .....	62
5.2	Huokosaukon efektiivisen koon mallintaminen .....	64
5.2.1	<i>Trakeidien ominaishuokaisuus</i> .....	67
5.2.2	<i>Efektiivinen huokosaukon koko</i> .....	68
5.3	Huokosmallien materiaaliominaisuudet ja dimensiot.....	70
5.3.1	<i>Neliömalli</i> .....	71
5.3.2	<i>Kennomalli</i> .....	72
5.3.3	<i>Epäsymmetrinen malli</i> .....	74
6	PUUN SOLURAKENTEEN KOSTEUDEN SIIRTYMISEN LASKENTATULOKSET .....	76
6.1	Kosteusvirta ja kosteusvirran tiheys.....	77
6.2	Kosteuspitoisuus ja kosteuskertymä.....	80
6.3	Suhteellinen painonmuutos .....	81
6.4	Diffuusiokertoimet .....	85
7	LIIMATÄYTEISEN PUUSOLUKON MALLINTAMINEN JA LASKENTATULOKSET .....	91
7.1	Laskentamallien rakenne .....	92
7.2	Liiman materiaaliominaisuudet.....	94
7.3	Kosteusvirta ja kosteusvirran tiheys.....	95
7.4	Kosteuspitoisuus ja kosteuskertymä.....	96

7.5	Suhteellinen painonmuutos .....	97
7.6	Diffuusiokertoimet .....	98
8	TULOSTEN TARKASTELU .....	101
8.1	Efektiivisen huokosaukon merkitys kosteuden siirtymiseen .....	103
8.2	Puolipaksuuden merkitys kosteuden siirtymiseen .....	108
8.3	Mallin muodon ja dimensioiden vaikutus kosteuden siirtymiseen .....	112
8.4	Puusolukossa olevan liiman merkitys kosteuden siirtymiseen .....	115
9	PÄÄTELMÄT .....	120
	LÄHDELUETTELO .....	125
	LIITTEET	
	Liite A: Solurivin digitointitulokset	
	Liite B: Eteläsuomalaisen kuusen mikroskooppikuvista lasketut solumuotojen jakautumat	
	Liite C: Elohopeaporosimetriajojen laskentatulokset	
	Liite D: Vertailumallin analyttisen ratkaisun suhteellisen painonmuutoksen laskentatulokset	
	Liite E: Vertailumallin NISA:lla lasketut suhteellisen painonmuutoksen arvot	
	Liite F: Verteilumallin NISA:lla lasketut elementtien kosteusvirrat	
	Liite G: Efektiivisen huokosaukon laskenta	
	Liite H: Epäsymmetrisen mallin geometria tiedot	
	Liite I: Laskenta-ajojen elementtien kosteusvirrat	
	Liite J: Kennomallin suhteellisen painonmuutoksen ja kosteusvirran tiheyden kuvaajat	
	Liite K: Stationaarisen laskennan diffuusiokertoimet eri pinnansiirtokerrointen arvoilla	
	Liite L: Hetkellisten diffuusiokertoimien kuvaajat	
	Liite M: Laskennan värähtely	
	Liite N: Tasa-arvopinta-alakuvaajat	



## SYMBOLILUETTELO

A	Pinta-ala [ $\text{m}^2$ ]
$A_G$	Pinta-ala, jonka kosteusvirta läpäisee [ $\text{m}^2$ ]
C	Arrheniuksen yhtälössä käytettävä vakio
$D_c$	Diffuusiokerroin kun potentiaalina on ilman tai huokosilman kosteuspitoisuus [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$D_{c,\text{air}}$	Ilman diffuusiokerroin kun potentiaalina on ilman tai huokosilman kosteuspitoisuus [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$D_{c,\text{eff}}$	Huokosaukon efektiivinen diffuusiokerroin kun potentiaalina on ilman tai huokosilman kosteuspitoisuus [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$D_{c,s}$	Kiintoaineen diffuusiokerroin kun potentiaalina on ilman tai huokosilman kosteuspitoisuus [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$D_{ss}$	Stationaarisen tapauksen diffuusiokerroin [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$D_{tr}$	Epästationaarisen tapauksen diffuusiokerroin [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$D_\omega$	Diffuusiokerroin kun potentiaalina on puun kosteuspitoisuus [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$D_{\omega,s}$	Kiintoaineen diffuusiokerroin kun potentiaalina on puun kosteuspitoisuus [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
E	Suhteellinen painonmuutos simuloitussa sorptiokokeessa [-]
$E_b$	Sidotun veden aktivaatioenergia [J/mol]
G	Kosteusvirta [kg/s]
I	Sähkövirta [A]
K	Lämmönjohtavuusmatriisi [W/mK]
$L_a$	Soluseinässä olevan aukon leveys [m]
$L_{a-\text{eff}}$	Soluseinässä olevan aukon leveyden ja huokosaukon leveyden erotus [m]
$L_{\text{eff}}$	Huokosaukon efektiivinen leveys [m]
$L_G$	Mallin sivunpituus, jonka kosteusvirta läpäisee [m]
$L_i$	Etäisyys $i$ -akselin suunnassa [m]
M	Kumulatiivinen kosteuskertymä [kg]
$M_f$	Kumulatiivinen kosteuskertymä lopussa [kg]
$M_i$	Kumulatiivinen kosteuskertymä alussa [kg]
P	Huokoisuus [%], [-]
R	Yleinen kaasuvakio (8,314) [J/molK]
R	Vastus [ $\Omega$ ]
T	Lämpötila [K]
V	Tilavuus [ $\text{m}^3$ ]

U	Jännite [V]
Z	Kosteuden vastus [s/m]
c	Vesihöyrypitoisuus ilmassa tai huokosilmassa [kg/m <sup>3</sup> ]
c <sub>sat</sub>	Ilman kyllästyskosteus [kg/m <sup>3</sup> ]
c <sub>p</sub>	Ominaislämpö [J/kgK]
g	Kosteusvirran tiheys [kg/m <sup>2</sup> s]
l	Puolipaksuus [m]
m	Aika-askeleen kosteuskertymä [kg]
q	Lämpövirta [W/m <sup>2</sup> ]
t	Aika [s]
u	Puun kosteuspitoisuus kuivapainosta [kg/kg]
β <sub>c</sub>	Pinnansiirtokerroin kun potentiaalina on ilman tai huokosilman vesihöyrypitoisuus [m/s]
β <sub>ω</sub>	Pinnansiirtokerroin kun potentiaalina on puun kosteuspitoisuus [m/s]
φ	Ilman suhteellinen kosteus [-]
λ <sub>i</sub>	Lämmönjohtavuus suunnassa i [W/mK]
π	Pii (3,1416)
ρ	Puun tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>air</sub>	Ilman tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>s</sub>	Kiintoaineksen (puussa soluseinän) tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
ω	Kosteuspitoisuus puussa [kg/m <sup>3</sup> ]
ω <sub>f</sub>	Kosteuspitoisuus kiintoaineella tai puulla tarkastelun lopussa [kg/m <sup>3</sup> ]
ω <sub>i</sub>	Kosteuspitoisuus kiintoaineella tai puulla tarkastelun alussa [kg/m <sup>3</sup> ]
ξ	Kosteuskapasiteetti (sorptioisotermin kulmakerroin) $\left[ \frac{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right]$



## ALKULAUSE

Diplomityö aiheesta "Puun solukkorakenteeseen perustuva kosteuden siirtymisen mallintaminen" kuuluu perustutkimuspainotteiselta alkuosaltaan Suomen Akatemian rahoittamaan lokakuussa 1994 päättyvään projektiin "Solurakenteen vaikutus puun mekaanisiin ja kosteusteknisiin ominaisuuksiin". Soveltavammalta loppuosaltaan diplomityö kuuluu marraskuussa 1993 alkaneeseen Teknologian kehittämiskeskuksen (TEKES) ja Suomen Puututkimus Oy:n yhteisesti rahoittamaan projektiin "Puutuotteiden rajakerrosten ominaisuuksien mallittaminen."

Esitän kiitokseni työn valvojalle professori Pekka Kanervalle. Työn ohjaajaa tekniikan lisensiaattia Ilmari Absetzia kiitän työn aikana saamistani ohjeista ja neuvoista sekä suorasta palautteesta.

Mallintamisen alkuvaiheessa merkityksellisenä apuna oli diplomi-insinööri Simo Koponen. Kiitän häneltä työn aikana saamistani opastuksista ja rohkaisuista sekä hänen osoittamastaan elpymättömästä kiinnostuksesta työn etenemistä kohtaan.

Lisäksi haluan kiittää kaikkia projekteihin osallistuneita ja rahoittaneita osapuolia. Erityiset kiitokset osoitan henkilöille, jotka pystyivät helpottamaan työn tekoa.

Espoossa 31.10.1994



Janne Sihvonen

# 1 JOHDANTO

## *Tutkimuksen tausta*

Yleensä tarkasteltaessa kosteuden siirtymistä oletetaan diffuusion noudattavan Fickin lakeja. Myös puussa tapahtuvaa diffuusiota kuvataan yleisesti Fickin lakien avulla. Puun kiintoaine on hygroskooppista ja sillä on merkittävä kosteuskapasiteetti. Fickin laeista poikkeavasta kosteuskäyttäytymisestä on kuitenkin tehty havaintoja jo 1960-luvulta saakka. Stamm (1964) esitti puusolukossa olevat kosteudensiirtymisreitit, *soluontelo - soluseinä*, *soluontelo - huokosaukko* ja *jatkuva soluseinä*. Choong (1968) päätteli että Fickin lait eivät kuvaa riittävän tarkasti puun sorptiokäyttäytymistä ja kosteuden siirtymistä puussa koska diffuusiokerroin riippui kappaleiden paksuuksista ja puun kostumis- ja kuivumishistoriasta.

Soluseinän sidotun veden diffuusiokertoimen kasvaa voimakkaasti lämpötilan ja kosteuspitoisuuden kasvaessa (Stamm 1959). Diffuusiokertoimen on havaittu pienenevän tiheyden kasvaessa. Viitaten edellämainittuihin tekijöihin, Dinwoodie (1980) on esittänyt käytettäväksi diffuusiokertoimen vakioarvon sijasta hetkellistä kosteudesta riippuvaa diffuusiokerrointa. Vuosikymmenen 1970 puolivälissä, useat tutkijat ovat esittäneet diffuusiokertoimen riippuvan kosteuspitoisuuserojen aiheuttavan gradientin potentiaalista (Hämäläinen 1981). Skaar (1984) on esittänyt eri potentiaalien välisen yhteyden. Mallintaessaan diffuusiota Siau (1984) huomioi mallissaan huokosten aspiroitumisen. Liu (1988) kehitti Siaun mallia siten, että sidotun veden aktivaatioenergia on kiintoaineksen kosteuspitoisuuden funktiona. Liu selitti kuppikokeen ja sorptiokokeen koetulosten eroja kuppikokeen paksummalla seisovan ilmakerroksen pintavastuksella. Wadsön (1993) mukaan pintavastusta on osittain käytetty mittaustulosten ja laskelmamallien sovituspärametrina, sillä sama hetkellinen keskikosteus saadaan laskettua useilla diffuusiokertoimien ja pintavastuksien eri yhdistelmillä. Hän ei usko että pinnansiirtokerroin voisi kokonaisuudessaan selittää puun Fickin laeista poikkeavan kosteuskäyttäytymisen. Fickin laeista poikkeaminen havaitaan Wadsön (1993) mukaan mm. seuraavista tekijöistä:



Sorptiokokeen alussa suhteellisen painonmuutoksen kuvaaja ajan neliöjuuren funktiona ei kasva vakiona. Kasvun pitäisi pysyä lineaarisena aina arvoon  $E=0.6$ .

Paksuilla kappaleilla on havaittu olevan suurempi diffuusiokerroin kuin ohuilla kappaleilla.

Epästationaarinen sorptiokoe ja stationaarinen kuppikoe eivät anna samaa diffuusiokerrointa. Ohuilla koekappaleilla stationaarinen koe antaa selvästi suurempia diffuusiokertoimen arvoja verrattuna epästationaarisen kokeen arvoihin. Paksummilla koekappaleilla eri menetelmien vastaavuus paranee.

Nakano (1994) on esittänyt, että Fickin laeista poikkeava kosteuskäyttäytyminen adsorptiossa selittyisi puun turpoamisen seurauksena vesimolekyylien sitoutumispaikkojen lisääntymisellä sekä turpoamisen estämällä vesimolekyylien liikkeen hidastumisella.

Puun diffuusiokerroin stationaarisissa olosuhteissa määritetään kuppikokeella. Kuppikokeessa koekappale toimii kupin kantena. Koekappaleen liittyminen kuppiin tiivistetään esimerkiksi silikonilla. Kupin sisällä on kylläinen suolaliuos, joka pitää kupin sisällä olevan ilman tasaisessa suhteellisessa kosteudessa. Kupin ulkopuolella vallitsee eri suhteellinen kosteus kuin kupin sisällä. Kupin ulkopuolisen ilman suhteellinen kosteus pidetään vakiona. Kuppikokeessa odotetaan kunnes koekappaleen läpi kulkee tasainen kosteusvirta ajan funktiona. Tällöin voidaan punnitustuloksista laskea koekappaleen läpi kulkenut kosteusvirta ja diffuusiokerroin.

Sorptiokokeella tutkitaan epästationaarista diffuusiota. Vakio kosteuspitoisuuteen tasaannutettu koekappale siirretään toiseen suhteelliseen kosteuteen. Diffuusiota tutkitaan koekappaletta punnitsemalla määrätyn välein. Punnitustulosten avulla muodostetaan sorptiokuvaaja, josta lasketaan diffuusiokerroin. Diffuusiokerroin voidaan laskea Crankin (1975) esittämän yhtälön avulla suhteellisen painonmuutoksen kuvaajasta ajan neliöjuuren funktiona. Liu (1993) on esittänyt kuinka Crankin kaavan avulla pintavastus voidaan matemaattisesti erottaa diffuusiokertoimesta.

*Tutkimuksen tavoitteet, menetelmät ja rajaukset*

Puun Fickin laeista poikkeavaa diffuusiota on vaikea selittää pelkästään käytännön kokeiden avulla. Makroskooppisessa puussa havaitun ilmiön selvittämistä lähestytään tässä työssä simuloimalla kosteuden siirtymistä mikroskopiaan perustuvilla karakterisoiduilla solurakenteiden malleilla.

Elävässä puussa ytimen ja pinnan välisenä varsinaisena veden ja ravinteiden siirtoreittinä toimivat ydinsäteet. Kasvavassa puussa juurten ja neulasten välillä siirtoreitteinä runkossa trakeidien välillä ovat kaksipihaiset rengashuokokset. Kosteuden siirtymisen puutavarassa oletetaan pääsääntöisesti noudattavan elävän puun ravinteiden ja veden siirtymisreittejä. Tutkimus keskittyy vertikaalisysteemin reittien kautta tapahtuvaan puutavaran syitä vastaan kohtisuoraan kosteuden siirtymiseen.

Puun solukossa kosteus siirtyy kolmessa eri muodossa. Soluseinäissä kosteus siirtyy sidottuna vetenä. Kuivaamattoman puun soluontelossa kosteus siirtyy vesihöyrynä ja nestemäisenä vetenä. Kuivatun puun soluontelossa ei pääsääntöisesti ole nestemäistä vettä, vaan siirtyminen tapahtuu vesihöyrynä.

Työn ensimmäisenä tavoitteena oli vahvistaa hypoteesina ollut solurakenteen vaikutus makroskooppisen diffuusion Fickin laeista poikkeamiseen. Toisena tavoitteena oli saada uutta tietoa puun ja liiman rajapinnan kosteuskäyttäytymisestä solukkotason tarkastelun avulla.

Tutkimusmenetelmänä käytettiin simuloitua kuppi- ja sorptiokoetta. Solukkomallin päämuuttujina toimi rengashuokosten aspiraatioaste. Toisena tärkeänä muuttujana oli mallin puolipaksuus. Kosteuden siirtymistä tutkittiin erilaisilla puusolukkoa kuvaavilla geometrioilla. Tärkeänä tekijänä tutkimuksessa oli pinnansiirtokertoimen vaikutuksen minimoiminen.

Diffuusion simulointimenetelmältä vaadittiin soveltuvuutta sekä stationaariseen että epästationaariseen analyysiin ja lisäksi monimuotoisen geometrian käsittelyä. Edelliset ehdot täytti elementtiohjelma NISA:n (Numerically Integrated Elements for System Analysis) lämmönsiirtoanalyysi.



Simulointimenetelmää verrattiin elementtiohjelman KOST1 ja analyttisen laskennan tuloksiin. Vertailujen avulla selvitettiin NISAn käyttämän lämpöanalogian yhteys diffuusioon. Tarkasteluissa kosteuspitoisuus rajattiin hygroskooppiselle alueelle.

Tutkimuksessa keskityttiin kuusen solurakenteeseen perustuvaan kosteuden siirtymiseen. Mallinnuksessa huomioitiin vesihöyryllä täytetyt soluontelot, soluonteloiden rajoittamat soluseinät ja soluseinissä sijaitsevat rengashuokokset. Mallinnuksessa ei huomioitu ydinsäteitä eikä pihkatiehyitä. Kaikki materiaaliominaisuudet ja dimensiot oletettiin ajasta ja kosteuspitoisuudesta riippumattomiksi.

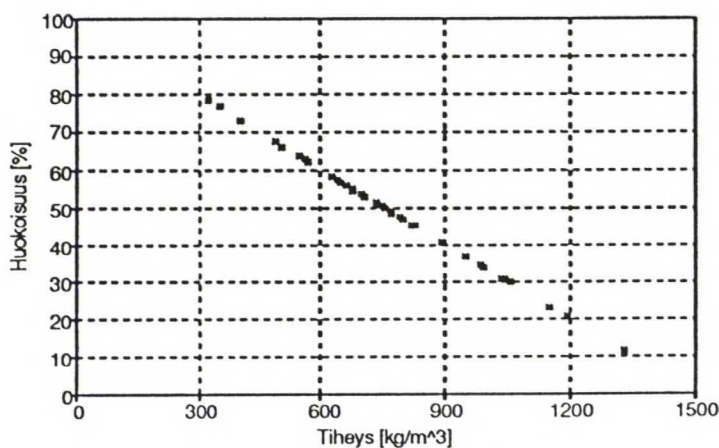
Diplomityön toisessa luvussa on koottu kirjallisuudesta löydetty sekä kokeellisesti analysoidut kosteuden siirtymisen mallintamiseen vaikuttavat puun solurakenteen dimensiot kosteudensiirtymisreittien kannalta. Kolmannessa luvussa esitetään NISA:n lämmönsiirtoanalyysin yhteys simuloituihin kuppi- ja sorptiokokeisiin lämmön ja kosteuden siirtymisen analogiaan perustuen. Neljännessä luvussa on vertailtu yksinkertaisen kiintoainesmallin NISA:n ratkaisuja analyttiseen ratkaisuun ja toiseen elementtimenetelmän ratkaisuun. Luvussa verifioidaan NISA:n laskentatuloksia. Tämän jälkeisessä luvussa käsitellään solukkomallien idealisointia ja karakterisoidaan siirtymisreittien dimensioista laskentamallit. Kuudennessa luvussa esitetään puun solukkorakenteeseen perustuvien kosteuden siirtymisen mallien laskentatulokset. Seisemännessä luvussa muodostetaan solukkomalleista liimatäytteisiä solukkomalleja sekä esitetään niiden laskentatulokset. Kahdeksannessa luvussa on analysoitu sekä puun solurakenteeseen perustuvien mallien laskentatuloksia että liimatäytteisen solukon laskentatuloksia. Lopuksi on päätelty puun solukkorakenteen ja liimatäytteisen solukon vaikutusta diffuusiokäyttäytymiseen ja Fickin laeista poikkeavaan diffuusioon.



## 2 KOSTEUDEN SIIRTYMISEN MALLINTAMISEEN VAIKUTTAVA PUUN SOLURAKENNE

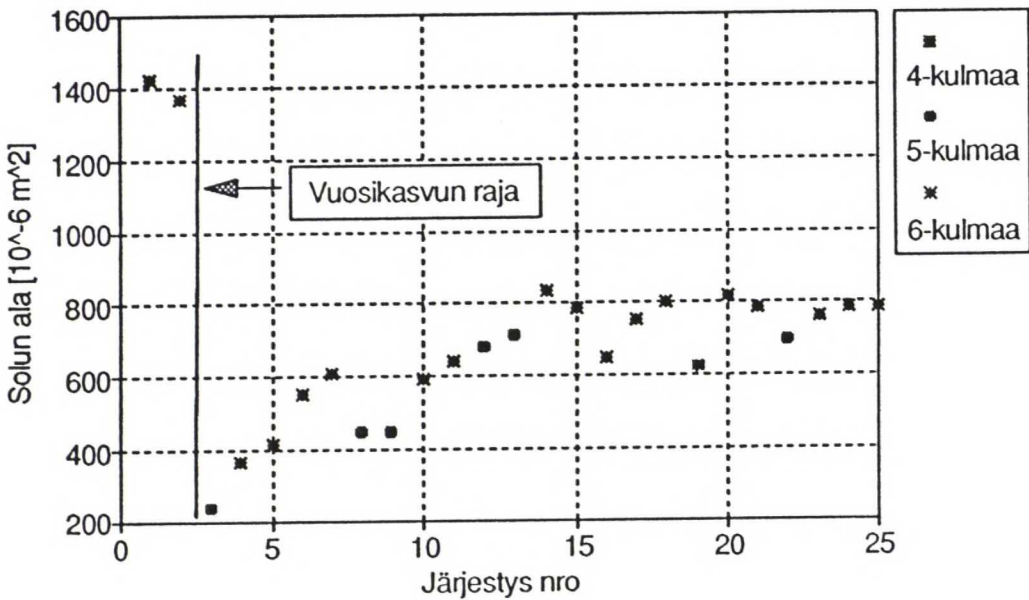
Puu eli ksyleemi muodostuu kasvien johtosolukoista. Mekaanisessa puunjalostuksessa käytetään sekundaarista ksyleemiä eli jälsilieriöstä sisäänpäin syntynyttä solukkoa. Havupuiden sekundaarinen ksyleemi voidaan jakaa vertikaali- ja horisontaalisysteemiin. Systeemit muodostuvat suippu- eli prosenkyymisoluista sekä tylppy- eli parenkyymisoluista. Kaikista soluista 90 % - 95 % on trakeideja. Havupuiden anatomista rakennetta voidaan pitää solukotyyppiltään melko homogeenisena ja suhteellisen yksinkertaisena (Pyykkö 1979).

Säännöllisen solukkorakenteen vuoksi havupuun kiintotiheys on poikittaisleikkauksessa lähes suoraan verrannollinen soluseinän pinta-alosuuteen solun pinta-alasta. Soluseinä koostuu selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Näiden materiaalien kuivatiheydet ovat  $1550 \text{ kg/m}^3$ ,  $1666 \text{ kg/m}^3$  ja  $1347 \text{ kg/m}^3$ . Koponen (1989) käytti mallintaessa suomalaisia havupuita eri osa-aineiden prosentuaalisena jakautumana 49 %, 24 % ja 27 %. Tällä jakaumalla soluseinän tiheydeksi tulee  $1523 \text{ kg/m}^3$ . Kollmann (1968) on esittänyt soluseinälle kiintotiheyden arvon  $1500 \text{ kg/m}^3$ . Puun tiheyden vaihtelu selittyy huokoisuuden vaihtelulla. Huokoisuuden riippuvuutta tiheyteen esitetään kuvassa 1.



Kuva 1. Solujen tiheyden suhde huokoisuuteen kuusen mikroskooppikuvan (Tuuli Timonen) digitointitulosten perusteella. Kuvassa on mukana soluja aivan vuosikasvun rajalta, ensimmäisistä kevätpuun soluista viimeisiin kesäpuun soluihin.

Tuloksista voidaan havaita erittäin suuri tiheyden vaihtelu kuusen kesä- ja kevätpuusolujen välillä. Tiheysvaihtelun lisäksi solujen koko ja muoto vaihtelevat vuosilustojen sisällä. Solun pinta-alan vaihtelu vuosiluston sisällä on esitetty kuvassa 2. Solun pinta-alaan on laskettu soluseinät mukaan. Pinta-ala on laskettu digitoimalla mikroskooppinäytteen diakuvasta solun reunaviivat ja määritetty reunaviivojen väliin jäävä pinta-ala. Digitoititiedot liitteessä A.

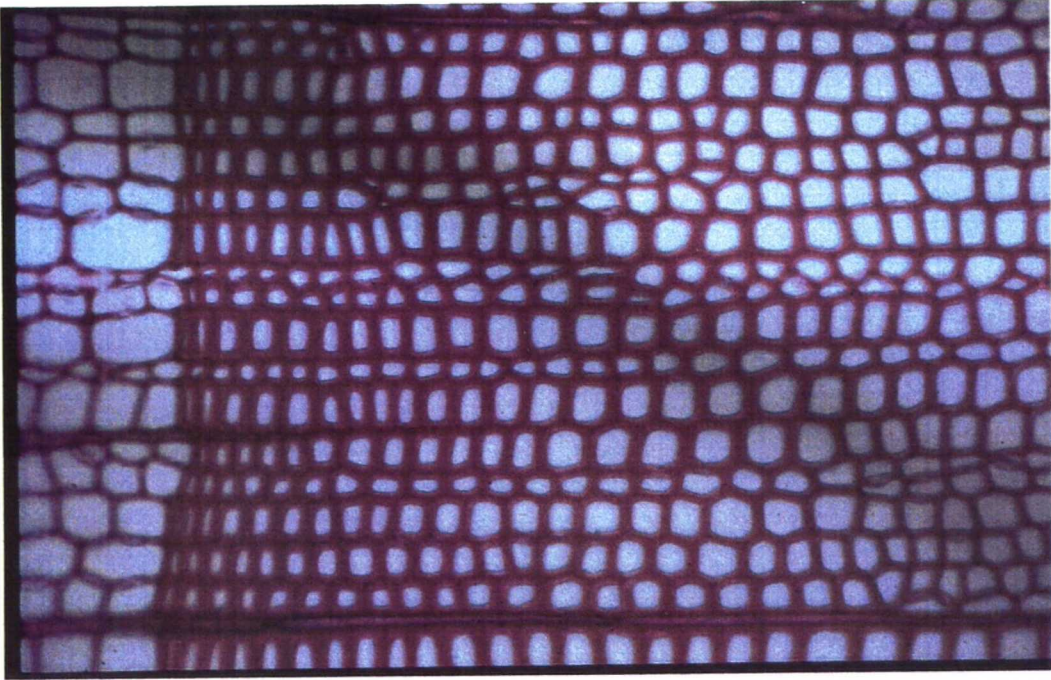


Kuva 2. Solujen pinta-alan vaihtelu suhteessa sijaintiin vuosikasvussa. Pinta-alassa on laskettu soluseinät mukaan soluonteloiden ala. Solut ovat vuosikasvun rajalta kahden ensimmäisen solun ollessa kevätpuusoluja ja muiden viimeisiä kesäpuusoluja. Välistä puuttuu vyöhyke (15 - 25 solua), jossa kesäpuu muuttuu kevätpuuksi.

Kuvassa 3 on esitetty kuusen solukkoa josta edelliset kuvaajat oli muodostettu. Kuvasta voidaan havaita että säännölliseltä näyttävästä solujakaumasta huolimatta vuosiluston tiheys- ja huokoisuusjakauma on erittäin heterogeeninen. Kuvassa näkyy pihahuokosia joidenkin solujen välisissä soluseinissä. Kosteuspitoisuuserot tasoittuvat kosteuden siirtyessä soluseinien, soluonteloiden ja soluonteloiden välisten huokosaukkojen läpi. Huokosaukot voivat olla joko avoimia tai suljettuja. Kosteuden siirtymisen mallintamisessa huomoidaan soluseinän, soluonteloiden ja huokosaukkojen osien dimensioid ja lukumäärät.

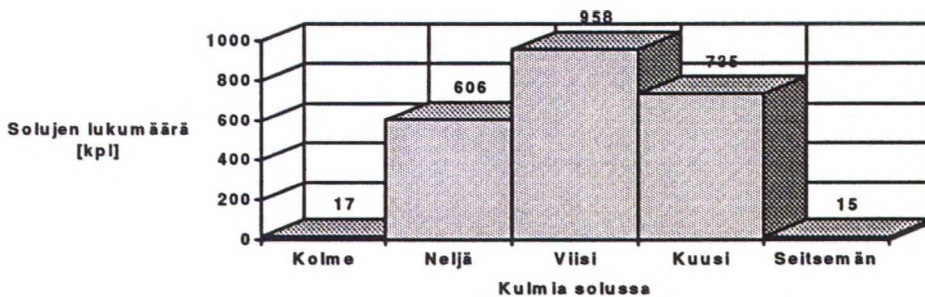


Mallintamisessa jätetään huomioimatta koko horisontaalisysteemi. Kosteuden siirtymisen oletetaan tapahtuvan vertikaalisen systeemin huokosaukkojen kautta horisontaalisesti.



Kuva 3. Kuusen solurakennetta vuosikasvun rajalla. Kuvan kolmanneksi ylin solurivi digitoitiin ja oli lähtötietona mallien laadinnassa. Mittakaava on 1:0,005. Mikroskooppikuva Tuuli Timonen Helsingin yliopiston kasvitieteen laitos.

Kuvasta 3 havaittu solumuotojen epäsäännöllisyys, vahvistuu jo pienestä 2331 solun otoksesta tehdystä solumuotojen laskennasta (kuva 4). Solumuotojen laskentatulokset liitteessä B.



Kuva 4. Kuusen (*Picea Abies*) solumuotojen lukumääräinen jakautuminen 2331 solun otoksesta.



Tyypillisiä kosteuden siirtymisen mallinnuksessa tarvittavia kuusen soluihin ja soluseiniin sekä rengashuokosiin liittyviä dimensioita esitellään seuraavissa luvuissa. Dimensioita selvitettiin mikroskooppitulosten analysoinnilla ja katsauksella kirjallisuuteen.

## 2.1 Trakeidit

Havupuussa trakeidit toimivat rungon tukisolukkona ja samalla vedenjohtajina. Täysikasvuiset trakeidit ovat kuolleita soluja. Kevätpuussa trakeidit ovat suurionteloisia ja ohutseinäisiä. Kesäpuussa trakeidin läpimitta säteen suunnassa on huomattavasti pienempi kuin kevätpuussa. Kesäpuun soluseinät ovat paksuja ja soluontelot pieniä. Trakeidien pääasiallisena tehtävänä on toimia tukisolukkona. Kirjallisuudesta löydettyjä trakeidien läpimittoja on esitetty taulukossa 1. Trakeidien läpimitat sisältävät trakeidien seinät sekä välilamellit.

*Taulukko 1. Kuusen (Picea abies) trakeidien läpimittoja [ $\mu\text{m}$ ]. Läpimitat sisältävät soluontelon ja soluseinän eri kerrokset.*

Tangentin suuntainen		Säteen suuntainen		Lähde
Kevätpuu	Kesäpuu	Kevätpuu	Kesäpuu	
26,4-32,7-38,7	26,4-32,1-38,7	19,4-39,3-56,1	7,7-13,1-20,6	Fengel
31,0	28,8	30,3	17,7	Johansson
30,1	-	27,5	-	Ollinmaa
28,7	28,4	32,6	20,1	Koskelo

Trakeidien läpimitta tangentin suunnassa on lähes yhtäsuuri sekä kesä- että kevätpuussa. Tämä johtuu ksyleemin sekundaarisesta paksuuskasvusta. Sekundaarista paksuuskasvua tapahtuu jälsisolujen jakautuessa tangentin suuntaisesti uusiin tytärsoluihin. Jakautumisessa syntyy sekundaarista puuta sisäänpäin. Solujen jakautuminen tapahtuu kasvukauden aikana eli voimakkaimmillaan keväällä. Kesällä jakautuminen tapahtuu hitaammin ja solun kasvu kestää kauemmin. Kaikki syntyneet solut jäävät samaan riviin. Rivien välillä on tangentin suuntaista solujen läpimitan vaihtelua. Rivin sisällä solun tangentin

suuntaisen läpimitan vaihtelu on hyvin pientä. Trakeidit kasvavat aluksi pääasiassa säteen suunnassa sekä vähän pituussuunnassa. Laajenemisen loputtua alkaa pituussuuntainen kasvu. Täyden kokonsa saavutettuaan alkaa muodostua soluseinän eri kerroksia. Solun säteen suuntainen läpimitta on kevätpuussa huomattavasti suurempi kuin kesäpuussa (Pyykkö 1979).

Taulukossa 2 esitetään kirjallisuudesta löydettyjen trakeidien seinien paksuuksia. Seinän paksuuden mittaamenetelmänä Ollinmaa (1961) käytti mittausta soluontelosta toiseen puolittamalla tuloksen.

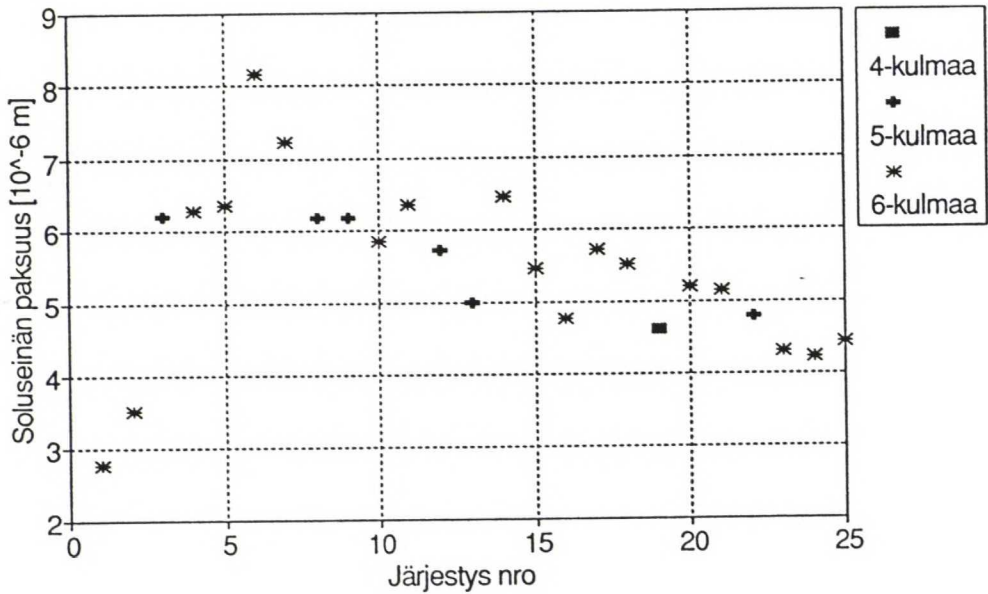
*Taulukko 2. Kuusen (Picea Abies) trakeidien seinien paksuuksia [ $\mu\text{m}$ ]. Paksuus on ilmoitetun suuntaisen soluseinän paksuus kohtisuoraan ilmoitetun suuntaista seinää vastaan.*

Kevätpuu		Kesäpuu		Lähde
Tangentti	Säde	Tangentti	Säde	
1,80		4,44		Fengel (1969)
2,90	3,52	4,69	6,23	Ollinmaa (1961)
2,45	2,0	5,05	6,4	Koskelo (1992)

Taulukossa 2 olevat soluseinän paksuuden arvot ovat keskimääräisiä soluseinien arvoja. Eri lähteiden välisten tulosten hajonta voi olla seurausta soluseinän paksuuden määrittelytavasta ja otoksen laajuudesta sekä kasvupaikan ja geneettisten tekijöiden aiheuttamasta vaihtelusta.

Kuvassa 5 on esitetty keskimääräisen soluseinän paksuuden riippuvuutta solun sijainnista vuosikasvussa. Soluseinän paksuudet on digitoitu kuvan 3 kolmanneksi ylimmästä solurivistä. Kuvasta 5 nähdään soluseinän paksuuden pienentyvän lähestyttäessä kevätpuuta. Digitoidut soluseinän paksuudet osuvat lähelle Ollinmaan mittaamia arvoja. Solun pinta-ala ei kuitenkaan kasvanut kyseisessä solurivissä kuten kuvasta 2 huomattiin.

Ollinmaa (1961) laski kuusen trakeidien seinämän prosentuaaliseksi osuudeksi trakeidien läpimitasta säteen suunnassa 19,3 % ja tangentin suunnassa 25,6 %.



Kuva 5. Soluseinän paksuuden vaihtelu suhteessa sijaintiin vuosikasvussa. Soluseinien paksuudet on mitattu digitoimalla kuvan 3 kolmanneksi ylintä soluriviä ja laskettu erisuuntaisten soluseinien paksuuksien keskiarvo.

Havupuiden trakeidien on todettu olevan kesäpuussa 11 % pidempiä kuin kevätpuussa. Trakeidien pituus voi kasvaa jopa 2 mm:stä aina 4 mm:n vuosiluston ohentuessa ja siirryttäessä ytimestä pintaan päin (Ollinmaa 1961), (Kärkkäinen 1979). Tsoumisin (1974) mukaan kasvunopeus ja lannoitus korreloi negatiivisesti trakeidin pituuden kanssa. Pituuden vähentyminen ei kuitenkaan ole merkittävää. Kirjallisuudesta löydettyjä kuusen trakeidien pituuksia on esitelty taulukossa 3.

Taulukko 3. Kuusen (*Picea Abies*) trakeidin pituuksia [mm].

Trakeidin pituus	Lähde
2,25	Ollinmaa (1961)
1,33-2,82-4,30	Bruun, Slungaard (1959)
2,50	Hosia et al. (1971)

Kuusella kesäpuuprosentti vaihtelee 10 % - 40 % välillä, keskiarvon ollessa noin 15 %. Mikolan (1962) mukaan (Kärkkäisen 1977) vuosikasvussa kesäpuusolujen ja kevätpuusolujen lukumäärä riippuu kasvukauden lämpötilasta. Vuosikasvun solujen kokonaislukumäärä vaihtelee kasvukauden olosuhteiden mukaan. Kuusella tiheys muuttuu

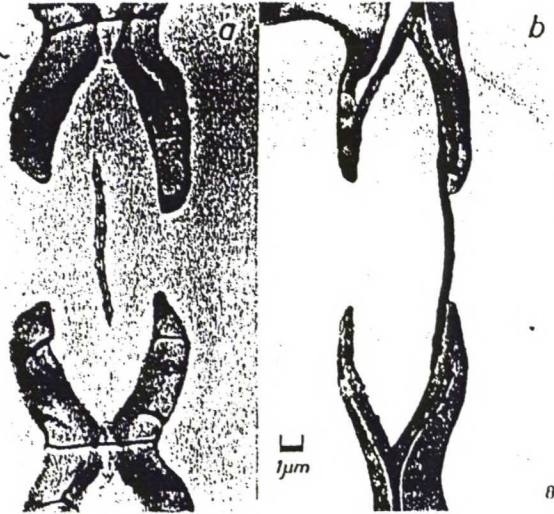


vain vähän siirryttäessä ytimestä pintaan päin (Kärkkäinen 1977). Vuosilustot ohentuvat siirryttäessä pintaan päin, lukuunottamatta aivan puun nuoruusvaihetta. Kuusen (*Picea Abies*) vuosiluston leveyden painotettu keskiarvo koko maassa on 1,74 mm (Jensen 1977).

## 2.2 Rengashuokokset

Varsinaisena veden ja ravinteiden siirtoreittinä pinnan ja ytimen välillä toimivat ydinsäteet. Ydinsäteiden prosentuaalinen osuus runkopuun tilavuudesta on Ollinmaan mukaan 5,9 %. Veden ja ravinteiden siirtyminen vertikaalisysteemissä trakeidista toiseen tapahtuu kaksipihaisen huokosparien välityksellä. Kaksipihaisen huokosparin muodostaa kaksi toisiinsa johtavaa rengashuokosta ja niiden välissä oleva sulkukalvo. Sulkukalvon muodostavat primaariseinät ja niiden välinen keskilevy sekä niihin kerääntyneet aineet. Rengashuokosen huokostiehyt kapenee sulkukalvosta soluonteloon päin kohti huokosaukkoa. Soluontelon ja sulkukalvon välistä tilaa kutsutaan huokospihaksi. Sulkukalvossa huokosaukon kohdalla sijaitsee kiekkomainen paksunnos, torus. Sulkukalvossa torusta ympäröi margo. Margo koostuu löyhistä selluloosasäikeistä. Säikeiden välissä on useita pieniä reikiä.

Sulkukalvo voi painautua vasten huokosaukkoa jolloin huokosen sanotaan olevan aspiroitunut. Pyykön (1979) mukaan vain kevätpuun huokokset aspiroituvat. Liesen ja Bauchin (1967) mukaan kuusen kesäpuun huokosista on havaittu 20 % - 25 % olevan aspiroitumattomia. Aspiraatiota on ilmeisesti kahta eri tyyppiä. Aspiraatiota esiintyy sydänpuun muodostumisen aikaan ja kuivattaessa puuta vedestä ja eräistä muista nesteistä. Yleisesti ilmakeivä puun pintapuun kevätpuun solut ovat aspiroituneet lähes kokonaan. Aspiraatiota voidaan yrittää vähentää tai palauttaa esimerkiksi höyrytyksen avulla. Fengelin (1972) mukaan palautuminen on niin heikkoa että aspiraatioita voidaan pitää pysyvänä. Toruksen huokoisuuden takia rajallinen vedenläpäisevyys on kuitenkin mahdollista.



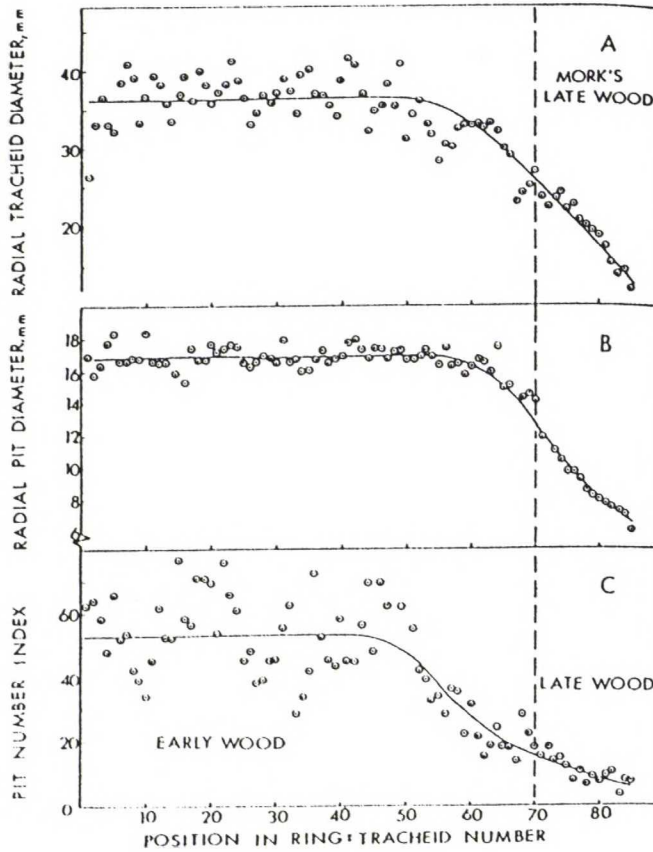
Kuva 6. Rengashuokonen joka on a) aspiroitumaton ja b) aspiroitunut. Kuvassa a) sulkukalvo on kahden rengashuokosen huokospihojen välissä. Sulkukalvon keskellä on torus jota ympäröi margo. Kuvassa b) sulkukalvo on painautunut huokosaukkoa kohti kaventunutta huokostiehyettä vasten (Fengel 1972).

Kevätpuun trakeidissa esiintyy 50 - 300 huokosta. Kesäpuun trakeidissa huokosia esiintyy huomattavasti vähemmän. Kevätpuussa huokokset sijaitsevat pääasiassa säteen suuntaisilla seinillä (Stamm 1964). Kesäpuussa huokosia on huomattavasti vähemmän ja vuosiluston rajalla vain noin 10 % kevätpuun määrästä. Tangentin suuntaisissa seinissä huokosia esiintyy viimeisissä 4 - 5 trakeidissa kesäpuussa. Kuusesta on löydetty myös kevätpuun trakeidien tangentin suuntaisissa seinissä olevan huokosia. Huokosten koon on havaittu olevan suoraan verrannollinen trakeidin läpimittaan. Kuitenkin kevätpuussa huokosten läpimitta oli jotakuinkin vakio, noin 16,4 µm, pienentyen vuosiluston rajalle siirryttäessä. Tangentin suuntaisten seinien huokosten läpimitat on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Kuusen (*Picea Abies*) tangentin suuntaisilla seinillä olevien huokosen halkaisijan (sulkukalvon) ja toruksen pituuden mittoja [µm] (Laming et al. 1971).

	Kevätpuu	Kesäpuu
Huokonen	6,7-9,6-13,3	5,7-8,4-10,5
Torus	3,9-4,4-4,8	2,3-3,3-4,2

Koran (1974) on havainnut riippuvuuden trakeidien ja huokosien halkaisijan välillä suhteessa sijaintiin vuosilustossa. Samalla on esitettyinä huokosten lukumäärän riippuvuus sijainnista vuosilustossa. Riippuvuudet on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Trakeidien a) ja huokosaukkojen halkaisijan b) ja huokosaukkojen lukumäärän c) suhde sijaintiin vuosikasvussa. Puulajina *Picea Marina* (Koran 1974).

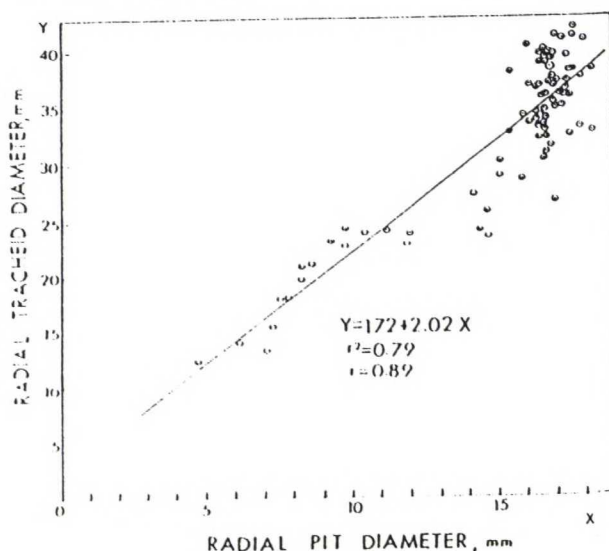
Säteen suuntaisilla seinillä huokosten läpimitalle (*Picea mariana*) Koran (1974) on esittänyt kaavan 1, jossa huokosen läpimitta on suoraan verrannollinen trakeidin läpimittaan. Tunnettaessa trakeidin läpimitta (Y) saadaan laskettua eri huokosten läpimitat (X).

$$Y=1,72+2,02 \cdot X \quad (1)$$

Kaava 1 antaa lineaarisen suhteen huokosaukon ja trakeidin läpimitan välille. Suhde on esitetty kuvassa 7.



- Koran (1974) oli tarkastellut *Picea Marinaa*. Tuloksia voidaan pitää vertailukelpoisina kuuselle (*Picea Abies*), missä on havaittu toruksen läpimitan olevan kolmasosasta puoleen huokosen läpimitasta.



Kuva 7. Trakeidin halkaisijan suhde huokosaukon halkaisijaan (Koran 1974).

Toruksen paksuus on kevätpuussa 0,3  $\mu\text{m}$  ja kesäpuussa 0,4  $\mu\text{m}$ . Toruksen paksuus voi vaihdella 0,1 - 0,5  $\mu\text{m}$ :in joten edellä mainitut arvot eivät ole ehdottomia (Siau 1984).

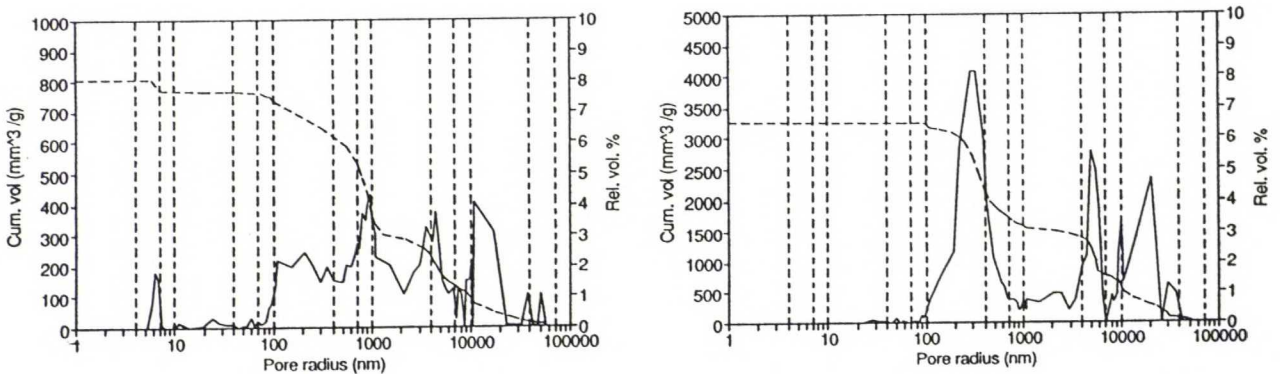
## 2.3 Margo

Torusta ympäröivän margon ominaisuudet ovat erilaisia kevät- ja kesäpuussa. Kevätpuun margo on ohut ja elastinen. Kesäpuussa margo on paksu, jäykkä ja inkrustoitunut (Pyykkö 1983). Thomasin (1967) mukaan margon huokoisuus voi vaihdella 10 % - 80 % välillä. Margon huokoisuuden vaihtelua esiintyy eri vuosilustojen välillä sekä vuosiluston sisällä (Comstock 1968).

Sachsin ja Kinneyn (1974) mukaan tuoreen kevätpuun margon aukkojen koko on pienempi kuin 70 nm. Toruksen lähellä margon aukkojen koko on 0,1 - 0,4  $\mu\text{m}$ . Puun kuivuessa margon mikrofibrillien väliltä voi välilamelli hävitä pois. Tällöin huokosen sulkukalvoon syntyy reikiä. Siaun (1984)

mukaan aspiroitumattomassa pintapuussa rengashuokosten margon reiät ovat tangentin suunnassa pienempiä kuin  $1,0\ \mu\text{m}$  ja säteen suunnassa pienempiä kuin  $2\ \mu\text{m}$ . Kaiken kaikkiaan reikien halkaisijan voidaan olettaa vaihtelevan  $0,02 - 4,0\ \mu\text{m}$ :in keskiarvon ollessa  $0,3\ \mu\text{m}$ :ä. Margon paksuus vaihtelee  $0,1 - 0,5\ \mu\text{m}$ :in keskiarvon ollessa  $0,2\ \mu\text{m}$ :ä.

Olettamusta margon aukkojen suuruudesta tukevat kuusen kevät- ja kesäpuuviilujen elohopeaporosimetriajot. Huokoisuuden huiput eivät ilmaise suoraan soluonteloiden kokoa. Suurimmat huokoskoot huokososuuskuvaajassa voidaan tulkita olevan lähellä pintaa olevia avoimia soluonteloita. Pienimmät huokoskokojen huiput oletetaan olevan osittain reittien halkaisijoita, joista pääsee soluontelosta toiseen. Toisaalta huippu huokososuuden  $100 - 200\ \text{nm}$  kohdalla kuvaa pienien huokosten osuutta, joilla täytetään suurien huokosten jättämät raot. Kevätpuu näytteissä oleva erittäin selvä kahden huokososuushuipun löytyminen vahvistaa olettamusta margosta löytyvien mikrofibrillien välissä olevien reikien koosta, jonka pääosa on välillä  $100 - 600\ \text{nm}$ .



Kuva 8. Porosimetriajotulokset a) kuusen kesäpuu- ja b) kevätpuunäytteestä. Huokososuuden  $100 - 400\ \text{nm}$  välillä oleva huippu kuvaajissa osuu kirjallisuudesta löydettyjen margon reikien kokoluokkaan.

Huokoskokokuvaajista kuvassa 8 havaitaan kesäpuussa olevan suhteellisesti tasaisemman huokoskokojakauman kuin kevätpuussa. Porosimetriaajoissa käytettyjen viilujen tiheystiedot ovat koottuna taulukkoon 5. Porosimetrillä mitatuista tiheyksistä jää pinnan rosoisuus huomioimatta. Koekappaleiden huokoisuus on saatu porosimetriaajojen tuloksena. Porosimetriaajojen rinnakkaiskoekappaleiden tulokset on



esitetty liitessä C. Kuvaajat ovat samankaltaisia kuvassa 8 esitettyjen tulosten kanssa. Taulukon 5 huokoisuuden arvot eri tiheyksillä ovat liian pieniä verrattuna kuvan 1 vastaaviin arvoihin. Vain kesäpuunäytteellä SPL1 arvot ovat suoraan verrannollisia. Eroa selittää muista näytteistä puuttuva pienien huokoskokojen (alle 10 nm) osuus.

*Taulukko 5. Porosimetriaajokappaleiden tiheys- ja huokoisuustiedot.*

KUUSIVIILU 32*23*1.6 mm <sup>3</sup>	TIHEYS [kg/m <sup>3</sup> ]	TIHEYS POROSIMETRILLÄ [kg/m <sup>3</sup> ]	HUOKOISUUS [%]
kesäpuu SPL 1	611,1	680,1	54,7
kesäpuu SPL 2	632,6	690,3	47,6
kevätpuu SPE 1	211,4	236,5	77,4
kevätpuu SPE 2	239,2	259,3	76,2

Tiheystietojen perusteella porosimetriaajonäytteet edustavat selvästi kesäpuuvoittoista solukkoa (SPL) ja pelkkää kevätpuusolukkoa (SPE). Näytteet oli valikoitu 1,6 mm:n paksuista kuusiviiluista. Pelkän kesäpuusolukon löytyminen ei ole mahdollista lähes vuosiluston paksuisesta näytteestä.

### 3 NISA:N LÄMMÖNSIIRTOANALYYSIN SOVELTAMINEN KOSTEUDEN SIIRTYMISEN LASKENTAAN

Lämmönsiirtoanalyysi käsittelee joko lämpöenergian virtaa tai lämmön siirtymistä lämpötilagradientin seurauksena. Lämpötilaerojen tasoittuminen tapahtuu kolmella erilaisella prosessilla. (NISA II User's Manual 1992)

*Lämmön johtumisessa* lämpöenergia siirtyy suoraan toisiinsa yhteydessä olevien molekyylien välillä. Tämä malli on yleinen kiinteillä aineilla, mutta esiintyy myös nesteillä ja kaasuilla.

*Lämmön konvektiossa* energia siirtyy pääasiassa molekyylien liikkeiden välityksellä. Konvektiota esiintyy vain nesteillä ja kaasuilla. Vapaassa konvektiossa lämpötilagradientti riippuu molekyylien sijainnista. Pakotetussa konvektiossa molekyylien sijaintiin vaikutetaan mekaanisesti.

*Lämpösäteilyssä* lämpöenergia siirtyy elektromagneettisten aaltojen välityksellä. Säteilyä voi tapahtua yhtä hyvin tyhjiössä kuin nesteissä, kaasuissa tai kiinteissä aineissa.

Kosteuden siirtymisen laskennassa käytettiin pääasiallisesti lämmön johtumista. Lämmön konvektiota käytettiin pinnansiirtokertoimen ja korkeamman kosteuspitoisuuden reunaehdon määrittelyssä.

Lämmönsiirtoanalyysin eri ilmiöiden tuloksena NISA antaa:

- solmujen lämpötilat
- solmupisteiden lämpövirran solmuissa, joille on määrätty tietty lämpötila
- lämpövirran halutuilla elementtiensivuilla käytettäessä tarkastelussa konvektio- tai säteilyreunaehto.

#### 3.1 Lämmön ja kosteuden siirtymisen analyysit

Kolmidimensioisen anisotrooppisen kappaleen lämmön johtumisen voidaan olettaa noudattavan Fourierin lakia:

$$q = -K \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

$$q = \text{lämpövirta} \left[ \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{s}} \right]$$

$$K = \text{lämmönjohtavuusmatriisi} \left[ \frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$$

Miinus-merkki lämmönjohtavuusmatriisin edessä tarkoittaa lämpövirtaa negatiivisen gradientin suuntaan suuremmasta lämpötilasta pienempään päin. Aineen lämpötilagradienttivektori  $(\partial T / \partial x)$  on karteesisessä koordinaatistossa (NISA II User's Manual 1992).

Stationaarisessa tilassa kosteusvirta on vakio ajan suhteen joka paikassa kappaletta. Tällöin kosteuden siirtymistä voidaan kuvata Fickin I lain avulla, kaava 3. Kaavassa 3 kosteusvirran tiheys on suoraan verrannollinen kosteuspitoisuusgradienttiin.

$$g = -D_{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x} \quad (3)$$

$$g = \text{kosteusvirran tiheys} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right]$$

$$D_{\omega} = \text{diffuusiokerroin kun potentiaalina on puun kosteuspitoisuus} \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

Diffuusiokertoimen sijasta voidaan käyttää jotakin muuta kosteudenjohtolukua, jos kosteuden siirtymisen aiheuttavana potentiaalina käytetään jotakin muuta kuin puun kosteuspitoisuutta. Muita potentiaaleja ovat vesihöyryn osapaine, kemiallinen potentiaali, osmoottinen paine ja laajenemispaine. Eri potentiaalien väliset yhteydet ja niissä käytettävät kosteudenjohtoluvut on esittänyt Skaar (1984).

Haluttaessa antaa eri dimensioille eri ominaisuudet, voidaan kolmidimensioisen kappaleen lämpövirta esittää matriisimuodossa:



$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \lambda_{zx} & \lambda_{zy} & \lambda_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \partial T / \partial x \\ \partial T / \partial y \\ \partial T / \partial z \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$q_i$  = lämpövirta suunnassa  $i$   $\left[ \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{s}} \right]$

$\lambda_i$  = materiaalin lämmönjohtavuus suunnassa  $i$   $\left[ \frac{\text{Jm}}{\text{m}^2 \text{sK}} \right]$

Kaavassa 4 lämpövirran suuruus ( $q_i$ ) on pinta-alayksikköä kohden suunnassa  $i$  (NISA II User's Manual 1992).

Lämpövirtaa kappaleen sisäosaan käsittävä lämmönjohtavuusyhtälö tai energiansäilymisen laki voidaan esittää muodossa:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

Tässä mallitustyössä tarkastellaan puussa olevaa yksidimensioista eli säteen suuntaista kosteuden siirtymistä lämmön ja kosteuden siirtymisen analogian perusteella. Kosteuspitoisuuden muutos alkukosteudesta oli yhden yksikön suuruinen. Ennen tarkastelun alkua ei vaikuttanut kosteusvirtaa. Tällöin lämmönjohtavuusyhtälö, kaava 5, saa muodon:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

$\rho$  = tiheys  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

$c_p$  = materiaalin ominaislämpö  $\left[ \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right]$

Fickin II:ssa laissa, kaavassa 7, epästationaaritilan kosteuden siirtymisen kosteuspitoisuus on ajan suhteen muuttuva. Kosteuspitoisuuden muutoksen potentiaalina on tässä tapauksessa ilman tai huokosilman kosteuspitoisuus. Kosteuspitoisuuden muutosnopeus on ohuessa ainekerroksessa verrannollinen kosteuden saapumis- ja

poistumisnopeuden differenssiin. Kosteuspitoisuuden muutosnopeuden kaava (7) on analoginen Fourierin lämmönjohtavuuden kaavan (6) kanssa.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( D_c \frac{\partial c}{\partial x} \right) = \xi \frac{\partial c}{\partial t} \quad (7)$$

$D_c$  = diffuusiokerroin kun potentiaalina on ilman tai huokosilman kosteuspitoisuus  $\left[ \frac{m^2}{s} \right]$

$\xi$  = kosteuskapasiteetti  $\left[ \frac{kg}{m^3} \frac{m^3}{kg} \right] = [ ]$

Fickin diffuusioyhtälöt ovat analogisia NISA:ssa käytetyn Fourierin lämmönjohtumisen yhtälöihin. Lämmönsiirtoanalyysissä on lämmönjohtumisen päämuuttujana lämpötila, kun kosteuden siirtymisen päämuuttujana on kosteuspitoisuus.

$$T \Rightarrow \omega \leftrightarrow [K] \Rightarrow \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad (A1)$$

Muut kaavoissa olevat tekijät muuttuvat siten, että lämpövirrasta tulee kosteusvirran tiheys,

$$q \Rightarrow g \leftrightarrow \left[ \frac{W}{m^2} \right] \Rightarrow \left[ \frac{kg}{m^2 s} \right] \quad (A2)$$

ja diffuusiokertoimesta tulee lämmönsiirtokerroin:

$$\lambda \Rightarrow D_\omega \leftrightarrow \left[ \frac{W}{mK} \right] \Rightarrow \left[ \frac{m^2}{s} \right] \quad (A3)$$

NISA:an lähtötietona syötettäessä diffuusiokerroin korvataan lämmönjohtumiskertoimella jaettuna aineen lämpökapasiteetilla ja tiheydellä. Tällöin lämmönjohtumiskerroin on muodossa

$$\lambda \Rightarrow \frac{D_c \rho c_p}{\xi} \leftrightarrow \left[ \frac{W}{mK} \right] \Rightarrow \left[ \frac{\frac{m^2}{s} \frac{kg}{m^3} \frac{J}{kgK}}{\frac{kg}{m^3} \frac{m^3}{kg}} \right] = \left[ \frac{W}{mK} \right] \quad (A4)$$

Ominaislämmön ja kosteuskapasiteetin välinen analogia on esitetty kaavassa 9 kappaleessa 3.5. Analogian vaikutuksen huomioimista käsitellään jokaisen lähtötietona syötettävän materiaaliominaisuuden osalta erikseen kappaleissa 3.5, 3.6 ja 3.7.

### 3.2 Laskenta-analyysi

Lämmönsiirtoanalyysijä voidaan NISAssa tarkastella lineaarisena tai epälineaarisenä laskentana. Tarkasteltavan mallin voidaan olettaa vallitsevan stationaarisissa (SHEAT) tai epästationaarisissa (THEAT) olosuhteissa (NISA II User's Manual).

Analyysin otaksutaan olevan stationaarinen jos materiaaliominaisuudet ja reunaehdot eivät ole ajasta riippuvaisia. Ohjelmalla voidaan analysoida sekä lineaarisia että epälineaarisia ongelmia. Ongelmaa pidetään lineaarisena stationaarisena lämmön siirtymisenä kun mallissa ei ole säteilyreunaehtoja, ei tapahdu faasimuutosta tai mallin materiaaliominaisuudet, konvektiokertoimet, erityiset lämpövirrat ja ominaislämpötilat ovat lämpötilasta riippumattomia. Jos joku ehdoista ei täyty, ongelmaa pidetään epälineaarisenä stationaarisena lämmön siirtymisenä (NISA II User's Manual 1992).

Stationaarisessa ratkaisussa iteraation suppenemiseen ja laskentatarkkuuteen voidaan vaikuttaa lämpövirran iteraation suppenemisen toleranssin suuruuden määrittelyllä.



Analyysin otaksutaan olevan epästationaarinen jos materiaaliominaisuudet ja/tai reunaehdot ovat ajan funktioina. Laskennan lineaarisuudella ja epälineaarisuudella on samat kriteerit kuin stationaaritilan tarkasteluissakin. Laskennan aika-askeleet voidaan pitää vakiona tai määritellä erikseen (NISA II User's Manual 1992).

Lineaarisella epästationaaritilan tarkastelulla voidaan reunaehtojen avulla simuloida sorptiokoetta. Epästationaarisella tarkastelulla pystytään vaikuttamaan aika-askeleen pituuteen. Aika-askeleen kestoa voidaan optimoida niin, että ratkaisussa ei esiinny häiritsevää värähtelyä laskenta-ajankaan muodostumatta kohtuuttoman pitkäksi. Epästationaarisella tarkastelulla voidaan selvittää kosteusvirran suuruus ajan funktiona. Stationaaritilan tarkastelu vastaa tässä työssä reunaehtojen avulla määritettynä diffuusiokertoimen mittausta kuppikokeen avulla.

### 3.3 Laskennan reunaehtojen tulkinta kosteyslaskennassa

NISAn elementtimenetelmään perustuvassa laskennassa osa-aineet jaetaan elementteihin. Elementeissä sijaitsee solmuja kulmissa ja mahdollisesti elementtien reunoilla. Eri reunaehdot kiinnitetään joko elementteihin tai solmuihin. Elementin ominaisuuksia käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa 3.4.

-

Reunaehtona toimiva ominaislämpövirta voidaan kiinnittää joko solmuun tai elementin reunaan. Solmuun kiinnitettyä ominaislämpövirtaa kutsutaan keskitetyksi lämpövirraksi (CFLUX). Elementin reunaan kiinnitettyä ominaislämpövirtaa kutsutaan jaetuksi lämpövirraksi (DFLUX). Lämpövirta voi olla joko vakio tai vaihteleva koko elementin reunalla. Lämpövirran arvolla nolla ei kiinnityskohdassa ole lämpövirtaa. Tällöin mallista ei myöskään pääse poistumaan lämpöä kyseisen reunaehdon vaikutusalueelta (NISA II User's Manual 1992). Ominaislämpövirran reunaehto vastaa sorptio- tai kuppikokeen koekappaleen reunojen kosteussulkukäsittelyä.

Konvektioreunaehto (CONVBC) kiinnitetään elementin reunaan. Konvektioreunaehto voidaan asettaa joko vakioksi, vaihtelevaksi, lämpötilan funktioksi ja/tai ajan funktioksi. Konvektioreunaehto voidaan käyttää joko vapaassa tai pakotetussa konvektiossa, sekä epästationaarisessa että stationaarisessa tarkastelussa. Lisäksi konvektioreunaehto voidaan käyttää epälineaarisessa laskennassa (NISA II User's Manual 1992). Reunaehto käytettiin mallin korkeamman kosteuspitoisuuden päässä. Konvektioreunaehdon avulla saatiin tulokseksi kosteusvirran suuruus elementtiä kohden. Mallissa konvektioreunaehdolle annettiin koko tarkastelun ajan vakiona pysyvät pinnansiirtokertoimen ( $\beta_c$ ) ja lämpötilan eli tässä tapauksessa kosteuspitoisuuden ( $\omega_i$ ) arvot.

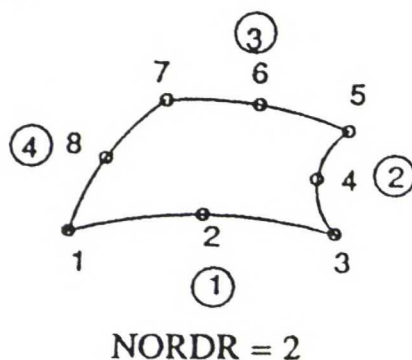
Määrätynlämpötilan (SPTEMP) avulla voidaan mallin jonkun osan lämpötila pitää vakiona koko analyysin ajan. Stationaarisessa ratkaisussa voidaan lämpötila asettaa vakioksi halutulle mallin osalle. Tämä vastaa kuppikokeen vakioilmastointihuoneen olosuhteita. Epästationaarisessa analysissa voidaan määrätty lämpötila asettaa ajasta riippuvaiseksi. Edellä mainitussa tapauksessa lämpötila määrätään aika-amplitudikäyrän mukaan jokaisen aika-askeleen alussa ja pidetään vakiona koko aika-askeleen ajan (NISA II User's Manual 1992).

Epästationaarisen analyysin alussa voi solmujen alkulämpötila (INTEMP) olla määriteltynä koko mallin alueella tai sen joillakin osilla (NISA II User's Manual 1992). Malleissa alkulämpötila oli nolla muilla solmuilla paitsi korkeamman kosteuspitoisuuden puoleisissa päässä olleilla solmuilla. Näille solmuille määriteltiin kosteuspitoisuuden alkuarvoksi yksi ja lisäksi pintavastuksen arvo. Reunaehdolla mallinnettiin porrasmaisessa sorptiokokeen tehtävää koekappaleen siirtämistä tasapainokosteudesta toiseen kosteuspitoisuuteen.

### 3.4 Elementtityyppi

Yksidimensioista kosteuden siirtymistä mallinnetaan kaksidimensioisella mallilla. Mallissa käytettiin kaksidimensioista tiheysyksiköllistä lämmön siirtymisen tasoelementtiä (NKTP=102). Elementtien muodoista valittiin nelikulmainen kahdeksansolmuinen elementti. Valitussa elementissä solmut olivat kaikissa kulmissa ja lisäksi reunojen keskellä (NORDR=2), kuva 9. Ympyröidyt numerot ovat elementtien reunojen numeroita.

Solmujen laatuusjärjestys määrää elementtien reunojen numerointijärjestyksen. Elementin vapausasteet muodostuvat solmujen lämpötiloista. Elementeissä on yksi vapausaste solmua kohden (NISA II User's Manual 1992).



Kuva 9. Mallinnuksessa käytetty tiheysyksiköllinen kahdeksansolmuinen lämmön siirtymisen tasoelementti. Elementin malli on NKTP=102 ja elementtityyppi NORDR=2 (NISA II User's Manual 1992).

Elementtien materiaaliominaisuudet voivat olla isotrooppisia tai ortotrooppisia. Koska tarkasteltiin vain yksidimensioista kosteuden siirtymistä, valittiin elementeille isotrooppinen materiaaliominaisuus. Syötettäviä materiaaliominaisuuksia ovat lämmönjohtavuus (KXX), ominaislämpö (C) ja tiheys (DENS). Stationaarisessa analyysissä elementeille ei ehdottomasti vaadita tiheyttä ja ominaislämpöä. Kosteuden siirtymisen tarkasteluissa lämmönjohtavuutta vastaa diffuusiokerroin ja ominaislämpöä vastaa kosteuskapasiteetti.



### 3.5 Kosteuskapasiteetti

Kosteuden siirtymistä ilmasta puuhun tai puusta pois eri ilman suhteellisilla kosteuksilla kuvaa sorptioisotermin. Kosteuskapasiteetti ( $\xi$ ) ilmoittaa tietyllä ilman suhteellisen kosteuden vaihteluvälillä puuhun tai puusta pois siirtyneen kosteuspitoisuuden. Kosteuskapasiteetti on yksikötön luku  $\left( \left[ \frac{\text{kg m}^3}{\text{m}^3 \text{ kg}} \right] = [ ] \right)$ .

$$\xi = \frac{\Delta u \rho_s}{\Delta \phi c_{\text{sat}}} \quad (8)$$

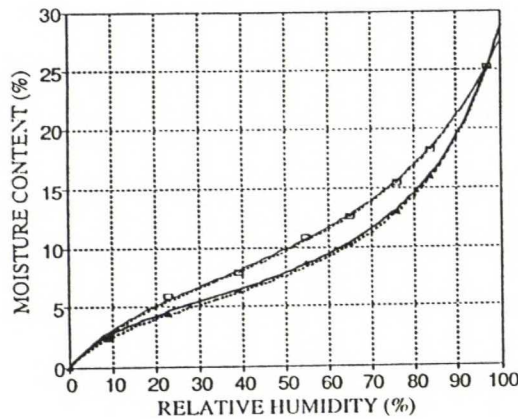
$\Delta u$  = puun kosteuspitoisuus kuivapainosta [%]

$\rho_s$  = soluseinän tiheys  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

$\Delta \phi$  = ilman suhteellisen kosteuden muutos [%]

$c_{\text{sat}}$  = ilman kyllästyskosteus lämpötilassa  $T$   $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

Tässä työssä kosteuskapasiteetti määriteltiin sorptioisotermin adsorptiokuvaajasta. Tarkasteltava ilman suhteellinen kosteus oli välillä 45 % - 75 %. Kuusen kosteuspitoisuuden muutokseksi saatiin kuvasta 10 väliltä 7,34 % - 12,81 %.



Kuva 10 Kuusen sorptioisotermin. Alempi käyrä on kuusen adsorptiokäyrä ja ylempi desorptiokäyrä (Absetz et al. 1993).

FEM-laskentaan kosteuskapasiteetti syötetään materiaalin ominaislämpönä. Lämmön- ja kosteudensiirtymisyhtälöiden analogiasta johtuen, kapasiteetti täytyy jakaa tarkasteltavan materiaalin kiintoaineen tiheydellä.

$$c_p = \frac{\xi}{\rho} \quad (9)$$

### 3.6 Soluseinän diffuusiokerroin

Kosteuden siirtymisnopeuden määrää vesimolekyylin aktivoitumisenergian suuruus. Siirtymisnopeus paikasta toiseen on suurempi, kun aktivaatioenergia on matalampi. Aktivoitumisenergia ja molekyylien siirtymisnopeus paikasta toiseen riippuvat toisistaan eksponentiaalisesti. Siirtymisnopeus on suoraan verrannollinen diffuusiokertoimeen ( $D$ ). Soluseinän diffuusiokerroin voidaan laskea Arrheniuksen yhtälöllä, jonka mukaan aktivoitumisenergian ja kosteudenjohtoluvun välillä vallitsee yhteys (Skaar 1988):

$$D_{\omega,s} = C e^{-\left[\frac{E_b}{RT}\right]} \quad (10)$$

$D_{\omega,s}$  = kiintoaineen diffuusiokerroin kun potentiaalina puun kosteuspitoisuus  $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

$C$  = Arrheniuksen yhtälön vakio

$E_b$  = vesimolekyylin aktivoitumisenergia  $\left[\frac{J}{mol}\right]$

$R$  = yleinen kaasuvakio  $8,314 \left[\frac{J}{molK}\right] \Leftrightarrow 1,986 = \left[\frac{cal}{molK}\right]$

$T$  = tarkastelulämpötila [K]

Stamm (1959) havaitsi lämpötilan ja puun kosteuspitoisuuden kasvamisen voimakkaan vaikutuksen sidotun veden diffuusiokertoimeen. Saman kosteusgradientin vallitessa veden siirtyminen suurilla kosteuksilla on

huomattavasti nopeampaa kuin matalilla puun kosteuspitoisuuksilla. Siau (1984) muodosti Stammin tuloksista sidotun veden aktivaatioenergiälle yhtälön:

$$E_b = 9200 - 70 u \quad (11)$$

$$E_b = \text{vesimolekyylin aktivoitumisenergia} \left[ \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right]$$

$$u = \text{puun kosteuspitoisuus kuivapainosta} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg} - \text{kuiva}} \right]$$

Kaava 11 pätee puun kosteuspitoisuuden kuivapainosta ollessa välillä 5 % - 25 %.

Stammin (1964) mukaan kosteuden siirtyminen on pituussuuntaan kolminkertaista tangentin ja kaksinkertaista säteen suuntaan verrattuna. Mallissa kosteus siirtyy solusta toiseen solujen välisten huokosaukkojen kautta sekä soluseinän lävitse. Kosteuspitoisuuden erojen tasoittuminen mallissa on yksidimensioista. Kaksiulotteisessa mallissa ei tarkastella pituussuuntaista kosteuden siirtymistä. Mallissa käytetään keskimääräistä diffuusiokerrointa säteen suuntaiselle kosteuden siirtymiselle. Liun (1989) aineiston perusteella keskimääräisestä diffuusiokertoimesta lämpötilan funktiona voidaan laskea Arrheniuksen yhtälöön vaadittava vakio C.

Mallitukseen diffuusiokerroin on laskettu kaavalla:

$$D_{c,s} = C e^{-\left[ \frac{38518,56 - 293,076 u}{RT} \right]} \quad (12)$$

NISA:ssa mallinnuksessa käytettiin lähtötietojen syötössä potentiaalina ilman kosteuspitoisuutta ja siksi kaavassa 12 tehdään potentiaalin muunnos puun kosteuspitoisuudesta ilman kosteuspitoisuuteen.



### 3.7 Pinnansiirtokerroin

Koska NISA:ssa ei saada suoraan tulostettua malliin siirtynyttä kosteusmäärää, käytetään konvektioreunaehto. Konvektioreunaehdossa tulee määritellä pinnansiirtokerroin ( $\beta$ ) ja reunassa vallitseva kosteuspitoisuus. Pinnansiirtokerrointa tarkasteltiin turbo pascal -ohjelmalla KOST1. Pinnansiirtokerroimen arvo on pyritty määrittelemään yhdelle ilmaelementille saman suuruiseksi kuin yhden kiintoaineselementtikerroksen kosteudenvastus.

$$\beta_{\omega} = \frac{D_{\omega,s}}{\frac{1}{20} \ell} \quad (13)$$

$\beta_{\omega}$  = pinnansiirtokerroin kun potentiaalina on puun kosteuspitoisuus  $\left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

$\ell$  = puolipaksuus [m]

FEM-laskentaan pinnansiirtokerrointa joudutaan muuntamaan potentiaalın muutoksella:

$$\beta_c = \beta_{\omega} \xi \quad (14)$$

$\beta_c$  = pinnansiirtokerroin kun potentiaalina ilman tai huokosilman vesihöyrypitoisuus  $\left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

### 3.8 Diffuusiokertoimen laskenta

Diffuusiokerroin lasketaan kosteusvirran arvon avulla. Kosteusvirta saadaan NISA:n elementtikohtaisten lämpövirtojen avulla. Diffuusiokertoimen määrittämiseen FEM-laskennan tuloksista käytetään tapaa määrittää diffuusiokerroin suhteellisen painonmuutoksen ja ajan neliöjuuren kuvaajan kulmakertoimesta. Diffuusiokerroin lasketaan kaavalla:

$$D_{\infty} = \frac{\pi \ell^2}{4} \left( \frac{dE}{d\sqrt{t}} \right)^2 \quad (15)$$

$E$  = suhteellinen painonmuutos [-]

$t$  = aika [s]

Hetkellinen diffuusiokerroin lasketaan kahden peräkkäisen suhteellisen painonmuutoksen tarkasteluajanhetken välisenä diffuusiokertoimena. Näiden diffuusiokerrointen avulla muodostetaan hetkellisen diffuusiokertoimen kuvaaja.

Kosteuden siirtymisen ollessa nopeimmillaan eli sillä ajanhetkellä kun hetkellisen diffuusiokertoimen arvo on suurimmillaan saadaan maksimi diffuusiokerroin  $D_{\max}$ .

Stationaaritilan tarkasteluissa saadaan NISA-ajon kosteusvirran arvojen avulla laskettua diffuusiokerroin kaavalla 16:

$$D_c = \frac{\sum^n G}{L_G 1000^2} \ell \quad (16)$$

$D_c$  = puun diffuusiokerroin kun potentiaalina ilman kosteuspitoisuus  $\left[ \frac{m^2}{s} \right]$

$G$  = kosteusvirta elementissä  $\left[ \frac{kg}{s} \right]$

$L_G$  = mallin sivunpituus, jonka kosteusvirta läpäisee [mm]

$n$  = elementtien määrä

Suhteellisen painonmuutoksen laskentaa, kosteusvirran käyttämisen muotoa ja yksiköissä tehtyjä mittayksikön muunnoksia käsillään erikseen luvussa 4.1.3.

#### 4 NISA:N LÄMMÖNSIIRTOANALYYSIN VERTAILU MUIHIN RATKAISUMENETELMIIN

NISA:n lämmönsiirtoanalyysin käytöstä diffuusiolaskentaan ei ollut aikaisempaa kokemusta. NISA:n tuloksia testattiin tämän vuoksi vertailemalla laskentatuloksia muiden menetelmien laskentatuloksiin. Vertailulaskelmat tehtiin kolmella eri menetelmällä. Menetelminä käytettiin elementtiohjelmaa NISA, analyyttistä ratkaisua ja elementtimenetelmään perustuvaa turbo pascal -ohjelmaa KOST1. Kaikki menetelmät soveltuvat epästationaarisissa olosuhteissa olevien kappaleiden yksidimensioisen kosteuden siirtymisen tutkimiseen.

Menetelmien vertailu tehtiin hyvin yksinkertaisen mallin avulla. Mallissa oli 20.92  $\mu\text{m}$ :n korkuinen kaistale pelkkää soluseinää, jonka puolipaksuus oli 42  $\mu\text{m}$ :ä. Mallin vasemmassa reunassa sijaitsee pinnansiirtokerrointa ja kosteuspitoisuutta määrittelevä konvektioreunaehto. Jaetun kosteusvirran reunaehto käytetään muilla reunoilla reunaehtona estämään kosteuden poistuminen mallista. Elementtiverkon tiheydeksi valittiin kahdeksan elementtiä pystysuunnassa ja 50 elementtiä vaakasuunnassa.

Pääasiallinen tarkoitus eri menetelmien vertailevassa käytössä oli määritellä pinnansiirtokerroin niin, ettei sillä ole laskentatuloksiin merkittävää vaikutusta. Lisäksi saatiin varmistus sekä syötettävien lähtötietojen oikeasta muodosta että laskentatulosten oikeasta käsittelystä.

Stationaaritilan tarkasteluilla selvitettiin kosteusvirran kohdistuminen malliin. Laskentatulokseksi pyrittiin saamaan laskennan lähtöarvona annettu diffuusiokerroin.

Pinnansiirtokertoimen arvon vaikutuksesta tulosten analysointiin pyrittiin saamaan varmistus sekä stationaarisella että epästationaarisella laskentamenetelmällä.



#### 4.1 Vertailevat laskennat ja laskentamenetelmät

Laskennan päämuuttujana oli kosteuspitoisuus ajan funktiona. Vertailtavina parametreinä pidettiin suhteellista painonmuutosta, kosteuskertymää sekä kosteusvirran tiheyttä. Kaikkia parametrejä tarkasteltiin ajan funktiona.

Ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin tutkimukseen soveltuva pinnansiirtokertoimen arvo. Vaihetta kutsutaan myöhemmin *pinnansiirtokertoimen selvittämiseksi*. Vertailevina laskentamenetelminä käytettiin analyyttistä ratkaisua ja elementtimenetelmää KOST1. Analyytinen ratkaisu ei huomionnut pinnansiirtokertoimen vaikutusta kosteuden siirtymisessä kun taas KOST1 huomioi. Menetelmistä saatiin vertailtaviksi tuloksiksi suhteellinen painonmuutos tarkasteltavana ajanhetkenä.

Toisessa vaiheessa selvitettiin elementtiohjelma NISA:n laskentatuloksena saatavan mallin kosteuspitoisuuden tasa-arvopinta-alakuvaajan vertailukelpoisuus analyyttisen ratkaisun antamaan suhteelliseen painonmuutokseen. Vertailu tehtiin NISA:n tasa-arvopinta-alakuvaajasta muodostetun paikan funktiona olevan kosteuspitoisuuskuvaajan avulla. Tätä vaihetta kutsutaan *tasa-arvopinta-alojen tarkistamiseksi*.

NISA:n ajotiedoston tulostiedostosta saatavista hetkellisistä elementteihin kohdistuvista kosteusvirroista muodostetaan kosteusvirran tiheys. Kolmannessa vaiheessa, *kosteusvirran tiheyden vertailu*, vertaillaan tulostiedoston kosteusvirrantiheyttä analyyttisen ratkaisun antamaan kosteusvirran tiheyteen. Tätä vertailua täydennettiin stationaaritilan tarkastelulla, jolla selvitettiin kosteusvirran elementtikohtaisuus. Tarkastuksella saatiin varmuus NISA:n soveltuvuudesta kosteuden siirtymisen tutkimiseen kun tasa-arvopinta-alakuvaajasta ei saada tarkkaa arvoa suhteelliselle painonmuutokselle. Tässä tapauksessa huokoisissa mallissa suuremman kosteuspitoisuuden päädyn läpi malliin siirtyvän kosteusvirran käyttö on varmin keino tarkastella suhteellista painonmuutosta ja sitä kautta diffuusiokerrointa.

NISA:ssa lähtötietojen syöttöpotentiaalina oli ilman kosteuspitoisuus ja muissa menetelmissä lähtötietojen syöttöpotentiaalina oli puun kosteuspitoisuus. NISA:sta lopputuloksena saatava diffuusiokerroin laskettiin menetelmällä, jossa potentiaaliksi tuli puun kosteuspitoisuus. Tällöin voitiin vertailla NISA:sta lopputuloksina saatuja soluseinän diffuusiokertoimia toisten menetelmien lähtöarvoihin.

#### 4.1.1 Analyttinen ratkaisu

Kun mallin kosteusvirta muuttuu ajan suhteen, tarkasteltava tilanne on epästationaarinen. Epästationaarisen diffuusioyhtälön analyttinen ratkaisu voidaan tehdä kun diffuusiokerroin on vakio. Fickin diffuusioyhtälöt ovat analogisia Fourierin lämmönjohtumisyhtälöihin. Epästationaarisen kosteuspitoisuuden ollessa ajan ja paikan funktiona diffuusioyhtälön ratkaisu on muotoa (Crank 1983):

$$\omega(x,t) = \omega_f + (\omega_i - \omega_f) * \frac{4}{\pi} * \sum_1^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} * \cos\left(\frac{(2n-1)*\pi*x}{2l}\right) * e^{\left(-\frac{(2n-1)^2 * D_a * t}{l^2} * \left(\frac{\pi}{2l}\right)^2\right)} \quad (17)$$

$$\omega = \text{kosteuspitoisuus} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\omega_f = \text{kosteuspitoisuus lopussa} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\omega_i = \text{kosteuspitoisuus alussa} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Tarkasteltaessa sorptiokokeesta saatavaa suhteellista painonmuutosta ajan funktiona, integroidaan kaava 17 mallina toimivan kappaleen yli. Sorptiokokeen suhteellisen painonmuutoksen kaavaksi saadaan Fickin II:n lain mukainen Fourierin sarjaratkaisu, kaava 18:

$$E(t) = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_1^{\infty} \left( \frac{1}{(2n-1)^2} e^{\left(-\frac{(2n-1)^2 D_a t}{l^2} * \left(\frac{\pi}{2l}\right)^2\right)} \right) \quad (18)$$

Kaava 18 ilmoittaa suhteellisen painonmuutoksen ajan, kappalepaksuuden ja vakiodiffusiviteetin funktiona. Tarkasteluissa diffuusiokertoimenä käytettiin puun kosteuspitoisuuden gradienttiin liittyvää diffuusiokerrointa, eli potentiaalina oli puun kosteuspitoisuus.

Fourierin sarjaratkaisu suppenee hyvin nopeasti. Laskentaan ei tarvitse ottaa mukaan useampia kuin kolme ensimmäistä termiä. Suhteellisen painonmuutoksen arvoa käytetään *pinnansiirtokertoimen selvittämisessä* ja *tasa-arvopinta-alojen tarkistamisessa*. Tämä simulointitapa ei huomioi pinnansiirtokertoimen vaikutusta.

Mallin lopputilan kosteuskertymän ja lyhyellä ajanjaksolla tapahtuvan suhteellisen painonmuutoksen avulla saadaan tarkasteltavan ajanhetken kosteusvirran tiheys:

$$g(t) = \frac{M_f \Delta E_{\Delta t}}{t \Delta t} \quad (19)$$

$$M_f = \text{kosteuskertymä lopussa} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Hetkellistä kosteusvirran tiheyttä käytetään *kosteusvirran tiheyden vertailussa*.

Alussa mallin kosteuspitoisuus oli nolla. Alkutilan kosteuspitoisuuden ja eri potentiaaleissa vaikuttavien diffuusiokertoimien suhteen avulla saadaan mallin lopputilan kosteuspitoisuus kosteuskertymänä:

$$M_f = M_i + \xi V \quad (20)$$

$$M_i = \text{kosteuskertymä alussa [kg]}$$

$$V = \text{tilavuus [m}^3\text{]}$$

Kappaleen lopullinen kosteuskertymä voidaan laskea, kun tunnetaan potentiaalina käytetyn puun kosteuspitoisuuden yhteys vertailutarkastelussa toimineen ilman kosteuspitoisuuteen. Eri



potentiaalissa vaikuttavien diffuusiokerroimien suhde saadaan sorptioisotermin kulmakertoimesta.

#### 4.1.2 Turbo pascal -ohjelma KOST1

Elementtimenetelmään perustuva ohjelma jakaa annetun puolipaksuuden suuruisen mallin elementteihin ja laskee elementtien reunojen suhteellisen painonmuutoksen. Lähtöarvoina syötetään mallin puolipaksuus ( $l$ ), tarkasteluajan pituus ( $t$ ), kappaleen diffuusiokerroin ( $D_w$ ) ja pinnansiirtokerroin ( $\beta_w$ ). Kaikki suureet syötetään SI-yksiköiden perusyksiköissä ja potentiaalina on puun kosteuspitoisuus.

Laskenta tapahtuu tarkasteluajan tuhannesosittain. Ohjelma muodostaa annetusta puolipaksuudesta 9 elementtiä ja lisäksi yhden pintavastuksen huomioon ottavan elementin. Tuloksia käytetään *pinnansiirtokerroimen selvittämisessä*.

Simuloidussa sorptiokokeessa elementtireunojen suhteellisten painonmuutosten keskiarvosta saadaan mallin keskimääräinen suhteellisen painonmuutoksen arvo. Ulkoreunojen suhteellinen painonmuutos huomioidaan puolitettuna kaavan 21 mukaisesti:

$$E(t) = \frac{\frac{\omega_1}{2} + \sum_{n=2}^{10} \omega_n + \frac{\omega_{11}}{2}}{10} \quad (21)$$

$\omega_n$  = kosteuspitoisuus reunassa  $n$   $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

Ohjelma on herkkä laskennan alussa tapahtuvalle värähtelylle. Aika-askeleen kokoa ei voi lyhentää alussa lyhentämättä koko tarkastelu-aikaa.

#### 4.1.3 Elementtiohjelma NISA

Elementtimenetelmään perustuvan ohjelman NISA:n laskentatarkkuus heikkenee tarkasteltaessa hyvin pieniä rakenteita, joiden dimensiot ovat paikoittain alle mikrometrin suuruisia. Laskentatarkkuuden parantamiseksi tehdään pituuden mittayksikössä dimension muutos. Pituuden perusmittayksiköksi valittiin millimetri. Mittayksikön muutos huomioidaan kaikissa niissä lähtöarvoissa ja tuloksissa, joiden yksikössä esiintyy tai esiintyi ennen sievennystä pituuden mittayksikkö.

Laskentatuloksina saadaan tulostiedostosta kosteuspitoisuuden tasa-arvopinta-alakuvaaja värikuvana. Kuvassa jokaisella värillä on kosteuspitoisuuden vaihteluväli. Kuvasta kappaleen suhteellinen painonmuutos saadaan summaamalla eri kosteuspitoisuudet painottamalla kosteuspitoisuuksia niiden pinta-alaosuuksilla. Yksinkertaistamiseksi mallin värillisestä tasa-arvopinta-alankosteuspitoisuuskuvasta tehdään kuvaaja, jossa akseleina ovat paikka ja kosteuspitoisuus. Kuvaajasta saadaan suhteellinen painonmuutos kaavalla 22:

$$E(t) = \frac{\int_0^l m dx}{l} \approx \frac{\left| \begin{array}{cc|cc|cc|cc} x_1 & y_1 & x_2 & y_2 & \dots & x_n & y_n \\ x_2 & y_2 & x_3 & y_3 & \dots & x_1 & y_1 \end{array} \right|}{2l} \quad (22)$$

Kaavaa 22 käytetään *tasa-arvopinta-alojen tarkistamisessa*.

Solmujen kosteuspitoisuus saadaan myös aikahistoriakäyrinä sekä xy-datana. Suhteellisen painonmuutoksen selvittämiseksi tarkastellaan malliin siirtyvän kosteusvirran aikahistoriaa. NISA:n ajotiedostosta saadaan numeroarvoina malliin siirtyvä kosteusvirta kunakin tulosten tarkasteluajanhetkenä. Kosteusvirta saadaan elementtiä kohti. Tarkasteltavaan kosteusvirtaan täytyy tehdä korjaus, jossa huomioidaan kosteusvirran läpäisemä pinta-ala. Lisäksi täytyy huomioida mallia

rakennettaessa tehty mittayksikön muunnos. Muunnosten jälkeen saadaan kosteusvirran tiheys kaavassa 23 esitetyllä tavalla.

$$g = \frac{\sum_{i=1}^n G}{A_G 1000^2} \quad (23)$$

$A_G$  = kosteusvirran läpäisemä pinta-ala [ $\text{mm}^2$ ]

Suhteellinen painonmuutos  $E$  saadaan kosteuspitoisuuden tai kosteuskertymän avulla:

$$E = \frac{\omega - \omega_i}{\omega_f - \omega_i} = \frac{M - M_i}{M_f - M_i} \quad (24)$$

$M$  = aika-askeleiden kumulatiivinen kosteuskertymä [kg]

koska

$$m = \omega V \quad (25)$$

Aika-askeleen kosteuskertymässä  $m$  saadaan kappaleessa olevan kosteuden painon lisäys aika-askeleen aikana. Kosteuspitoisuudessa  $\omega$  saadaan kosteuspitoisuus kuutiota kohti. Kosteuskertymä saadaan kertomalla kosteusvirran tiheys  $g$  tarkasteltavalla aikavälin muutoksella ja kosteusvirran läpäisevällä pinta-alalla. Pinta-ala on kosteusvirtaa vastaan mallin kohtisuora sivunpituus kerrottuna metrillä:

$$dm(t) = g A_G \Delta t = g L_G l \Delta t \quad (26)$$

$m$  = aika-askeleen kosteuskertymä [kg]

$A_G$  = pinta-ala, jonka kosteusvirta läpäisee [ $\text{m}^2$ ]

$L_G$  = mallin sivunpituus, jonka kosteusvirta läpäisee [m]



Tarkasteltavaan ajanhetkeen mennessä malliin siirtynyt kumulatiivinen kosteuskertymä saadaan hetkellisten kosteuskertymien muutosten summana:

$$M(t) = \int_0^t gA_G dt = \sum_0^n dm_n \quad (27)$$

Kosteuspitoisuuksien erojen tasoittumisen jälkeen kosteuskertymän lopullinen arvo saadaan summaamalla alkuhetken kosteuskertymä ja mallin eri aineiden tilavuusosuuksien kyllästymiskosteuskertymä:

$$M_f = M_i + (P + (1 - P)\xi)V \quad (28)$$

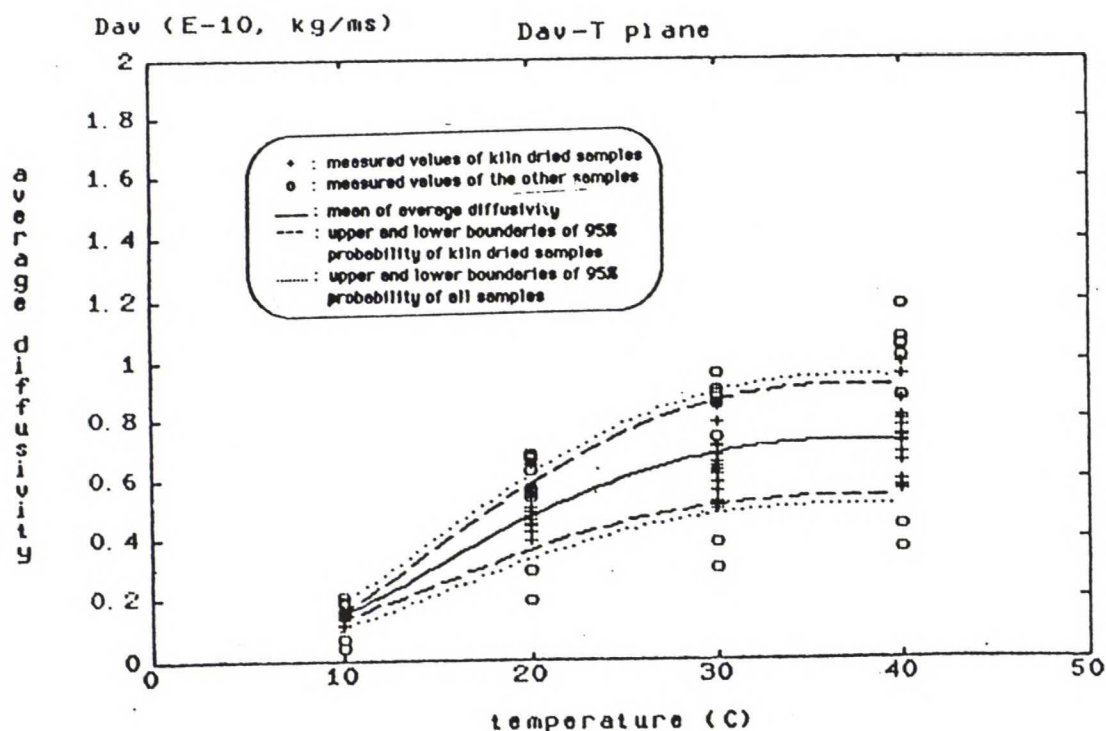
$P$  = huokoisuus [-]

Kosteusvirran tiheyden avulla saatua suhteellista painonmuutosta käytetään *kosteusvirran tiheyden vertailussa* kosteuspitoisuuden tasa-arvopinta-alakuvasta kaavalla 22 laskettuun suhteellisen painonmuutoksen vertailuun.

## 4.2 Laskennan lähtötiedot ja tulosten verifiointi

Puun tiheys korreloi soluseinän paksuuden kanssa. Soluseinän kuivatiheytenä käytetään arvoa  $1500 \text{ kg/m}^3$ . Tiheys pidetään vakiona kosteuspitoisuuden muutoksista huolimatta.

Materiaaliominaisuuksiin vaikuttavat tarkastelulämpötila ja ilman suhteellinen kosteuspitoisuus. Lämpötilan suhteesta keskimääräiseen diffuusiokertoimeen on Liu (1989) esittänyt kuvan 11 mukaisen riippuvuuden. Tarkastelulämpötilaksi valittiin  $285 \text{ K}$ . Korkeammassa lämpötilassa kosteuden siirtyminen vesihöyrynä on merkittävästi suurempaa.



Kuva 11. Lämpötilan vaikutus diffuusiokertoimeen (Liu, T. 1989).

Puunsyiden kyllästymispiste on yleensä kuusella 24 % - 30 %. Kun puun kosteus on puunsyiden kyllästymispisteen yläpuolella, kapillaarivoimat ja niihin liittyvät termodynaamiset potentiaalierot aiheuttavat nestemäisen veden siirtymisen. Tarkastelussa valittiin puun kosteuspitoisuuden arvoksi kuivapainosta noin 10 %.

Analyttisen ratkaisun avulla voidaan määritellä nopeasti mallin kosteuspitoisuuksien tasoittumiseen kuluva kokonaisaika riittävällä laskentatarkkuudella. Tämän avulla voidaan jaksoitella FEM-laskennan ajot sopiviksi kokonaisuuksiksi.

Laskentaa varten syötettävät lähtöarvot ovat joko mallin elementtien materiaaliominaisuuksia tai laskentaan syötettäviä reunaehtoja. Materiaaliominaisuuksien määrittäminen perustuu kirjallisuudesta saatuihin tietoihin kuusesta. Reunaehtona käytetty pinnansiirtokerroin pyrittiin määrittelemään suuruudeltaan sellaiseksi, ettei se vaikuta laskentatuloksiin. Laskennan lähtötiedot eri menetelmiä varten on koottu taulukoon 6.

Taulukko 6. Epästationaaristen olosuhteiden laskentojen lähtötiedot eri menetelmiä varten. Tarkastelulämpötilana 285 K. Ensimmäisessä ja NISA:n arvosarakkeessa potentiaalina on vesihöyrypitoisuus. Fourier ja KOST1 arvosarakkeessa potentiaalina on puun kosteuspitoisuus.

Para- metri			NISA		Fourier/KOST1	
	Arvo	[ ]	Arvo	[ ]	Arvo	[ ]
$\rho_s$	1500	kg/m <sup>3</sup>	1.5e-6	kg/mm <sup>3</sup>	1500	kg/m <sup>3</sup>
$\xi$	26379		1.76e+10		26379	
D	8.43e-8	m <sup>2</sup> /s	84.26e-3	mm <sup>2</sup> /s	3.19e-12	m <sup>2</sup> /s
$l$	4.2e-5	m	0.042	mm	4.2e-5	m
$\beta$	20.06e-3	m/s	2006.2	mm/s	7.61e-7	m/s

Stationaaritilan tarkastelut tehtiin vain FEM-laskennalla. Laskennan lähtötiedot on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Laskennan lähtötiedot stationaaristen olosuhteiden tarkastelua varten. Tarkastelulämpötilana on 293 K. Potentiaalina on käytetty vesihöyrypitoisuutta.

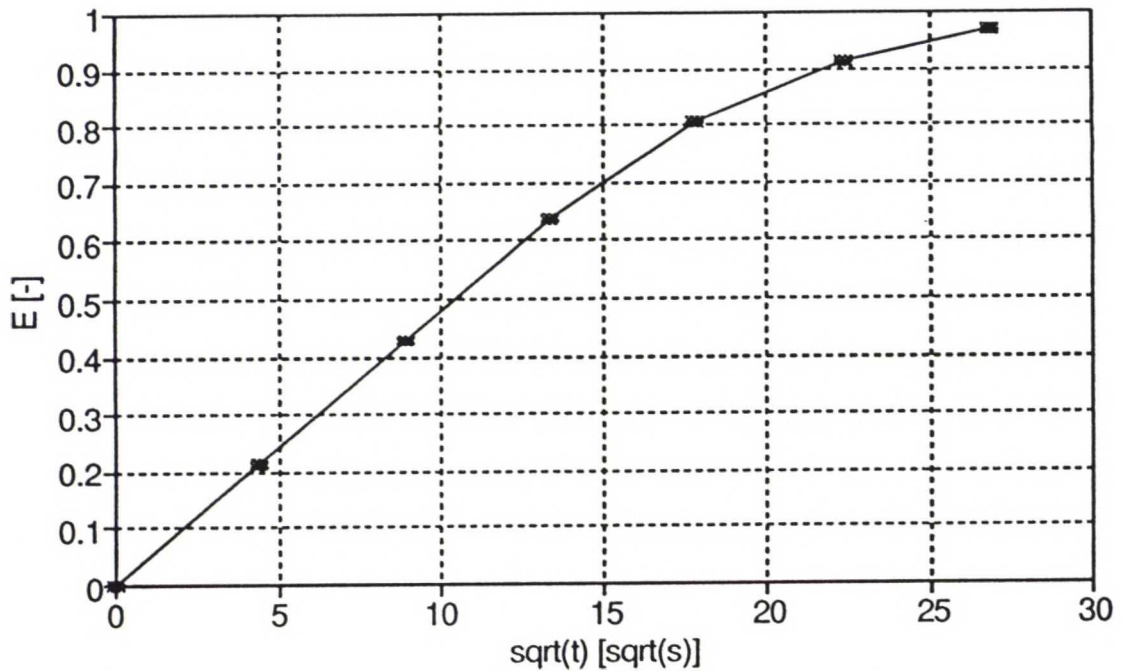
Para- metri			NISA	
	Arvo	[ ]	Arvo	[ ]
$\rho_s$	1500	kg/m <sup>3</sup>	1.5e-6	kg/mm <sup>3</sup>
$\xi$	12500		8.333e+9	
D	43.4e-9	m <sup>2</sup> /s	0.0434	mm <sup>2</sup> /s
$l$	150e-6	m	0.150	mm
$\beta$	20.06e-3	m/s	2006.2	mm/s

Stationaaritilan mallina käytettiin myös varsinaisissa tutkimuksissa käytettävää neliön muotoisista kennoista muodostuvaa neliömallia. Vertailussa mallin kaikille elementeille määrättiin materiaaliominaisuuksiksi soluseinän materiaaliominaisuudet. Mallin reunaehdoiksi määrättiin matalamman kosteuspitoisuuden pysyväksi arvoksi koko tarkastelun ajaksi 0 kg/m<sup>3</sup>. Mallin korkeamman kosteuspitoisuuden puoleiseen päähän määrättiin arvoksi 1 kg/m<sup>3</sup>.



Lopputuloksena pitäisi saada tilanne, jossa mallin keskimääräinen kosteuspitoisuus on  $0.5 \text{ kg/m}^3$ .

Vertailevissa tarkasteluissa käytettiin ajanhetkiä 2 s, 80 s ja 400 s tulosten analysointiin. Analyttisen ratkaisun suhteellisen painonmuutoksen kuvasta 12 nähdään painonmuutoksen pysyvän lähes vakiona aina lähelle ajanhetkeä 320 s. Vertailussa käytetty ajanhetki 400 s on lineaarisen osuuden jälkeen.



Kuva 12. Analyttisen ratkaisun suhteellisen painonmuutoksen kuvaaja. Painonmuutos pysyy vakiona arvon  $E = 0.6$  yläpuolelle. Tämän jälkeen alkaa painonmuutos hidastumaan. Huomattava hidastuminen tapahtuu arvon  $E = 0.95$  jälkeen.

Tulosten verifiointia on käsitelty pinnansiirtokertoimen osalta luvussa 4.2.1. NISA:n kosteusvirran suuruuden luotettavuutta käsitellään luvussa 4.2.2. NISA:n eri menetelmillä saatavia suhteellisen kosteuspitoisuuden arvoja käsitellään luvussa 4.2.3.

#### 4.2.1 Pinnansiirtokertoimen vaikutus

Aluksi määriteltiin pinnansiirtokertoimen suuruus ja sen vaikutus suhteelliseen painonmuutokseen. Pinnansiirtokerroin laskettiin kaavalla 13. Vertailevat tarkastelut tehtiin ensin KOST1:n (kaava 21) ja Fourierin sarjaratkaisun (kaava 18) välillä. Tarkastelu tehtiin aluksi käyttäen tarkasteluaikana 80 s:a. Tuloksen ilmenneen hajonnan seurauksena käytettiin lisäksi tarkasteluaikoina 2 s:a ja 400 s:a. Vertailevat tulokset menetelmien välillä vallitsevan suhteellisen painonmuutoksen vaihtelusta on esitetty taulukossa 8. Analyyttisen menetelmän eri tarkasteluajanhetkien laskentatulokset on esitetty liitteessä D.

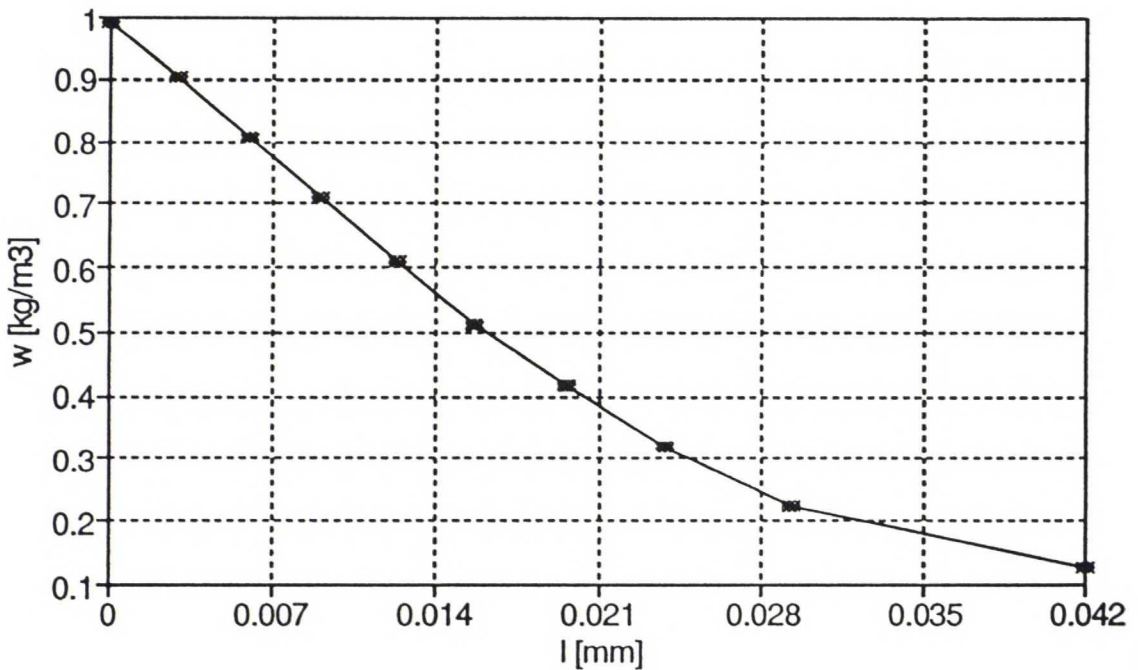
*Taulukko 8. Mallin suhteellisen painonmuutoksen vertailu analyttisellä ratkaisulla ja elementtimenetelmällä.*

Tarkasteluaika	Fourier	KOST1
2 s	0.068	0.074
80 s	0.430	0.396
400 s	0.864	0.817

Menetelmien välinen ero on selitettävissä KOST1-ohjelman laskentaepätarkkuudella ja pinnansiirtokertoimella. Ohjelmassa tapahtuu värähtelyä laskennan alkuhetkillä. Menetelmien välisten erojen suhde pienenee tarkasteluajan kasvaessa, joten lähtöarvojen tarkkuutta voidaan pitää kohtuullisena. Pinnansiirtokertoimen merkityksen pienentämiseksi NISA:n vertailussa Fourierin sarjaan suurennetaan pinnansiirtokertoimen arvoa kertomalla KOST1:ssä käytetty pinnansiirtokertoimen arvo sadalla. Pinnansiirtokertoimen suurentamisen vaikutus testattiin kahdella vertailevalla NISA-laskennalla. Vertailuajojen kuvaajissa havattiin pienemmän pinnansiirtokertoimen vielä hidastavan kosteudenjohtumista. Suuremmalla arvolla pinnansiirtokertoimen merkitys kosteuden johtumiseen poistuu lähes kokonaan.

Suuremman pinnansiirtokertoimen (2,0 m/s) vaikutusta tarkasteltiin NISA:lla laskentahetkillä 80 s ja 400 s NISA-laskenta ajettiin kolmessa

osassa. Ensimmäisestä ajosta määriteltiin välitarkasteluhetket 2 s:n välein 20 s:iin asti. Toisessa ajossa välitarkasteluhetket määriteltiin 20 s:n välein 100 s:iin asti. Viimeisen ajon päättymisen hetkeksi valittiin 400 s ja välitarkasteluhetket valittiin 40 s:n välein. Kosteuspitoisuuden tasa-arvopinta-alakuvaajasta tarkasteltiin suhteellista painonmuutosta valituilla laskentahetkillä. Tasa-arvopinta-alakuvaajasta muodostettiin kuva 13, josta laskettiin suhteellinen painonmuutos kaavalla 22.



Kuva 13. Vertailumallin kosteuspitoisuus NISA-laskennan tasa-arvopinta-alakuvaajasta muodostettuna. Tarkasteluajanhetki on 80 s.

Tarkasteluajankohdaksi valittiin ajanhetki 80 s, jolloin suhteellinen painonmuutos on noin 0.4. Varmistukseksi ettei tuloksissa esiinny hajontaa valittiin myös myöhempi ajanhetki 400 s, joka on vielä huomattavasti ennen kosteuspitoisuuksien erojen lopullista tasoittumista eikä kasvata laskenta-aikaa kohtuuttomasti. Tuloksia vertailtiin analyttiseen ratkaisuun. NISAn tasa-arvopinta-alakuvaajat ja niistä muodostetut kosteuspitoisuuskuvajaajat ajanhetkillä 80 s ja 400 s on esitetty liitteessä E. Lisäksi liitteessä on esitetty kosteuspitoisuuskuvasta lasketut etäisyydet ja niiden avulla muodostettu suhteellisen painonmuutoksen arvo.



Taulukko 9. Analyttisen ratkaisun ja elementtimenetelmän vertailu suhteellisella painonmuutoksella (E).

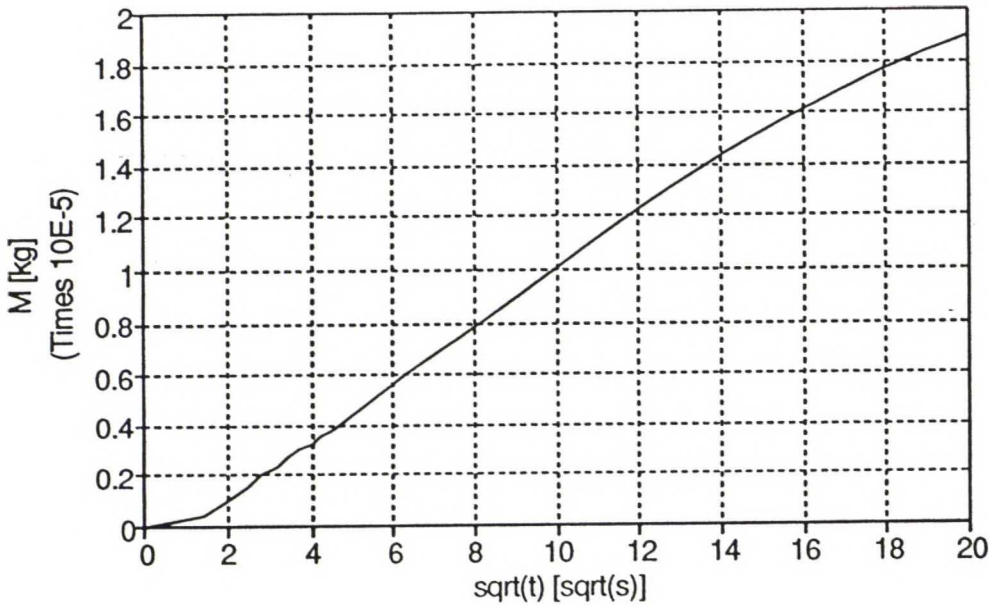
Tarkastelu aika	Fourier	NISA
80 s	0.430	0.433
400 s	0.864	0.865

Menetelmien välisten tulosten erot ovat hyvin pieniä. Eroja selittää mittausepä-tarkkuus suhteellisen painonmuutoksen kuvaajasta (Liite E) sekä epätarkka pinta-alaintegrointi kosteuspitoisuuden kuvaajasta (kuva 13). Pinta-alan määrittämiseen käytettiin kaavaa 22, joka ei huomioi eri pisteiden välisten käyrien muotoa, vaan olettaa välin suoraksi. Kuvaajasta tulee sahalaitainen kuvaaja. Erittäin pienen epätarkkuuden poistamiseksi ei ole tarpeellista käyttää funktiosovitetta tai muuta täsmällisempää menetelmää pinta-alan määrittämiseksi.

#### 4.2.2 Kosteusvirran suuruuden luotettavuus

NISA:n ajotiedoston tulostiedostosta saatiin elementtikohtaisia kosteusvirran arvoja valituilla tarkasteluajanhetkillä. Saadut kosteusvirran arvot lasketaan kaavan 23 mukaan ja tulokseksi saadaan vertailukelpoisia kosteusvirran tiheyden arvoja ajan funktiona. Kaavalla 27 kosteusvirrantiheyksistä muodostetaan kosteuskertymäkuvaaja ajan ja ajan neliöjuuren funktiona, kuva 14.

Kuvasta 14, jossa x-akselilla on ajan neliöjuuri ja y-akselilla kosteuskertymä, voidaan havaita alussa olleiden tarkasteluajanhetkien harvuus kuvaan alkuosan pienenä kulmakertoimena ajanhetkeen 2 s asti. Tämän seurauksena NISA:n laskemien kosteusvirtojen perusteella tehty kuvaaja sijoittuu kokonaisuudessaan liian alas. Analyttisellä ratkaisulla ja elementtimenetelmällä saadut kosteusvirran arvot on esitetty taulukossa 10. Analyttisen ratkaisun kosteusvirran laskenta on liitteessä 4 ja NISA:n elementtikohtaisten kosteusvirtojen arvot ja kosteusvirran tiheys on liitteessä F.



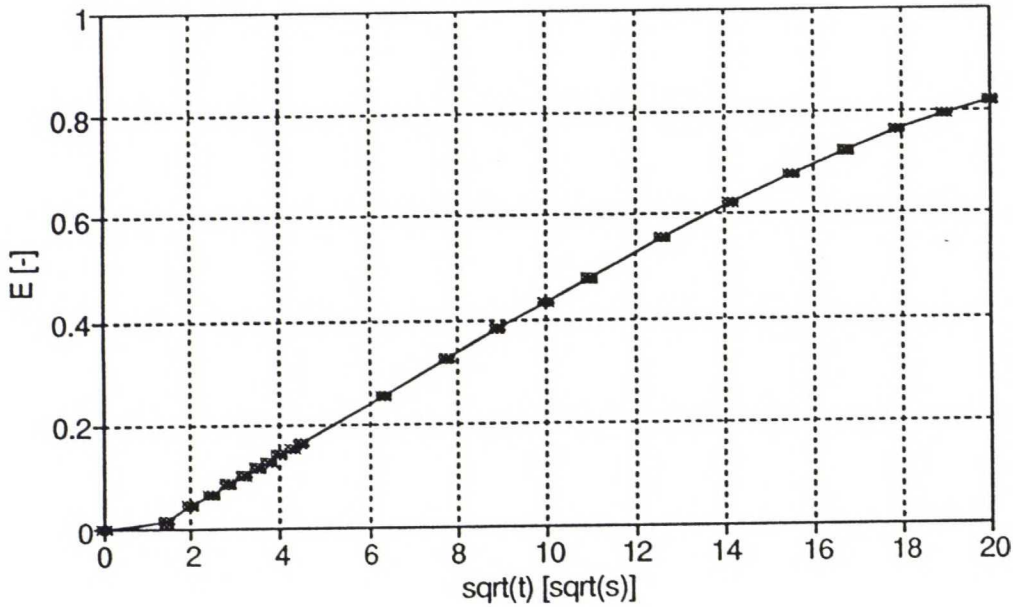
Kuva 14. Vertailu mallin kosteuskertymä NISA-laskennan tuloksena.

Taulukko 10. Kosteusvirran tiheyden suuruuden vertailu analyttisellä ratkaisulla ja elementtimenetelmällä. Yksikkönä on  $\text{kg/m}^2\text{s}$ .

Tarkasteluaika	Fourier	NISA
80 s	0.002968	0.002968
400 s	0.000672	0.000674

Kosteusvirran tiheyden arvot ovat eri menetelmillä lähes identtiset. Myös suhteellisen painonmuutoksen arvot saadaan toisiaan vastaaviksi laskemalla neljäs laskenta-ajo NISAlla. Neljännellä ajolla voidaan selvittää tarkemmin kosteuskertymä ennen ensimmäistä kahta sekuntia. Alkuhetkien vaikutusta voidaan myös selvittää tarkastelemalla kokonaisuutta jättämällä huomioimatta osuus ennen kahta ensimmäistä sekuntia. Tällöin lasketaan diffuusiokerroin soluseinälle suhteellisen painonmuutoksen väliltä 0.1 - 0.5.

Vertailevien laskentamenetelmien varmistukseksi lasketaan diffuusiokerroin NISA-ajon kosteusvirran tiheyden arvoista. Suhteellinen painonmuutos lasketaan kaavojen 24 ja 27 avulla ja muodostetaan ajan neliöjuuren suhteen oleva suhteellisen painonmuutoksen kuvaaja, kuva 15.



Kuva 15. Vertailussa käytetyn mallin suhteellinen painonmuutos NISA-laskennan kosteusvirran tuloksista muodostettuna.

Kuvasta 15 diffuusiokerroin lasketaan osuudelta, jolla ei alussa olleiden tarkasteluhetkien harvuus vaikuta. Valitaan tarkasteluväliksi keskimääräisen kosteuspitoisuuden väli 0.1 - 0.5. Laskemalla diffuusiokerroin voidaan tarkastaa laskennan tulos. Laskemalla diffuusiokerroin suhteellisen painonmuutoksen avulla, kaavalla 15, saadaan soluseinän diffuusiokertoimelle arvo  $3.19 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  eli sama kuin laskennan lähtöarvo, kun potentiaalina on puun kosteuspitoisuus.

Stationaarisen tilan tarkasteluissa laskentatulokseksi saatiin soluseinälle diffuusiokerroin  $4.34 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ , eli sama kuin lähtöarvo. Lähtöarvot annettiin niin, että potentiaalina oli ilman kosteuspitoisuus. Diffuusiokerroin laskettiin suoraan kosteusvirran tiheyden avulla, joten myös tulokset ovat samassa potentiaalissa. Samalla saatiin varmistus kosteusvirran kohdistumisesta elementtiä kohti. Tuloksista voidaan myös päätellä, että käytetty pinnansiirtokertoimen arvo on riittävän suuri, jotta sen merkitys on vähäinen myöhemmissä tarkasteluissa.

Näiden vertailevien tarkastelujen perusteella NISA:n epästationaarista lineaariseen laskentaan perustuvaa lämmönsiirtoanalyysiä voidaan pitää luotettavana laskentavälineenä kosteuden siirtymisen tarkasteluissa.



Erityistä huomiota tulee kuitenkin kiinnittää laskentatarkkuuteen aivan kosteudensiirtoprosessin alkuvaiheessa. Samoin laskennan aika-askeleen pituuden merkitys tulee tarkastaa erikseen jokaista mallia käytettäessä.

## 5 KOSTEUDEN SIIRTYMISEN LASKENTAMALLIEN MUODOSTAMINEN

Hygroskooppisella alueella kosteuden siirtymisen mallinnuksessa käytettävä puusolukko muodostuu pääasiallisesti vesihöyryllä täytetyistä soluonteloista, soluonteloita rajoittavista soluseinistä ja soluseinissä sijaitsevista rengashuokosista. Tarkasteltavan puusolukon solugeometrian ja tunnetun kosteusteknisen käyttäytymisen perusteella idealisoidaan tarkasteltava malli:

Taulukko 11. *Puun solumallin idealisointi.*

- A. SOLUKKO MUODOSTUU SOLUSEINÄMISTÄ JA NIIDEN VÄLISESTÄ ILMATILASTA
- B. SOLUSEINÄMÄSSÄ SIJAITSEE HUOKOSAUKKOJA
- C. KOSTEUSPITOISUUS EI VAIKUTA ASPIRAATIOASTEeseen
- D. SOLUGEOMETRIA EI MUUTU KOSTEUSPITOISUUDEN MUUTTUESSA
- E. KOSTEUSPITOISUUS PYSYY HYGROSKOOPPISELLA ALUEELLA
- F. SOLUKOSTA EI POISTU KOSTEUTTA
- G. SOLUKOSSA ON MERKITYKSELTÄÄN VÄHÄINEN VAKIO PINNANSIIRTOKERROIN
- H. SOLUSEINÄN JA SOLUONTELON MATERIAALIOMINAISUUDET EIVÄT OLE AIKA- EIVÄTKÄ KOSTEUSPITOISUUSRIIPPUVAISIA

Ilman huokosaukkoja toimivassa mallissa sidotun veden siirtyminen soluseinän läpi on hygroskooppisella kosteusalueella kosteudensiirtymisnopeuteen merkittävimmin vaikuttava tekijä. Kaksipihaisten huokosparien merkitystä kosteuden siirtoreittinä selvitetään taulukossa 11 lueteltujen rajoitusten avulla. Useimmat rajoitukset ovat erittäin yleistettyjä ja kasvattavat huokosaukon merkitystä kosteudensiirtoreittinä. Yleistysten vaikutusta on selvitetty tulosten analysoinnin yhteydessä.

Kosteuden siirtymisen laskentamalleissa vertaillaan eri solukko geometrian vaikutusta diffuusiokertoimeen. Pelkistetyimmän

laskentamallin solukko koostuu neliön muotoisista soluista ja vaativimmassa mallissa huomioidaan puun mikroskopiataloksiin perustuva epäsymmetrinen solurakenne. Tiheydeltään mallien solut pyrkivät edustamaan sekä kevät- että kesäpuusoluja.

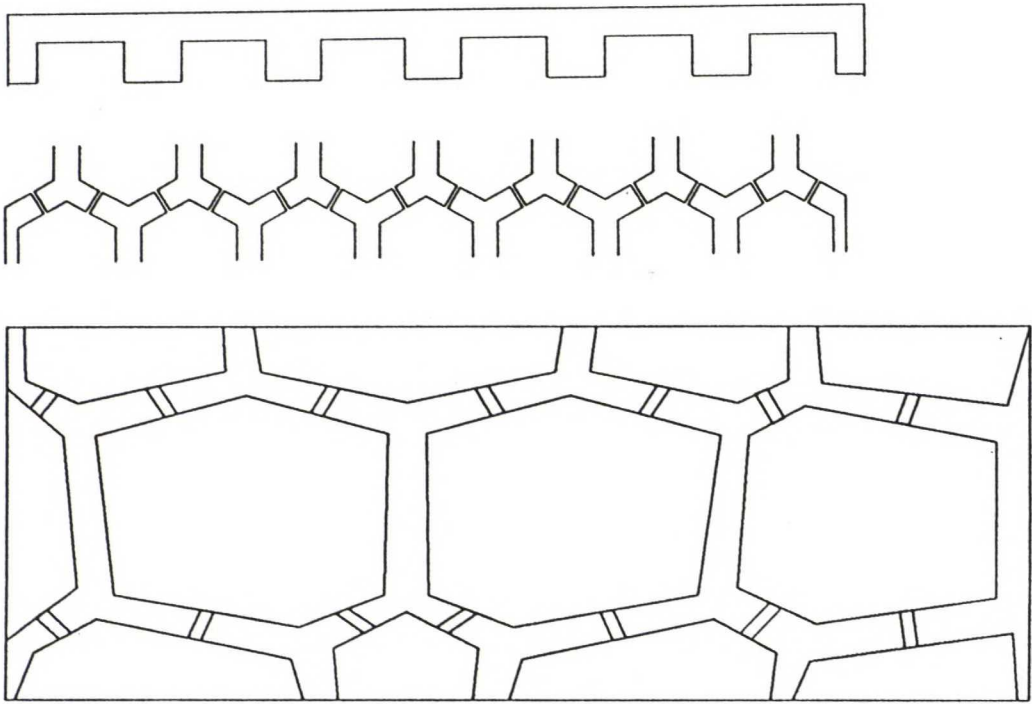
Eri malleja muodostettaessa on lähtökohtana ollut tavalliset kuusen solujen dimensiot. Efektiiviset huokosaukot muodostettiin huomioimalla solujen keskimääräiset dimensiot ja anatomian riippuvuus dimensioista. Efektiivisten huokosaukkojen muodostamiseen tarvittava tieto etsittiin kirjallisuudesta. Soluseinän huokoisuus koostuu malleissa huokosaukkojen lukumäärästä ja huokosaukossa sijaitsevan margon ominaisuuksista.

## 5.1 Laskentamallien geometriset muodot

Laskennassa eri mallien geometrioilla haettiin varmistusta huokosaukon vaikutuksesta kosteuden siirtymisen nopeuttamiseen ja puun Fickin lain vastaiseen käyttäytymiseen. Malleina käytettiin kolmea erilaista solukennostoa. Laskennan yksinkertaisin malli koostui neliön muotoisista kennoista. Tästä mallista käytetään nimeä *neliömalli*. Mallinnuksessa eniten käytettiin kuusikulmaisista kennoista koostuvaa *kennomallia*. Lähinnä todellista kuusen solugeometriaa on eteläsuomalaisen kuusen valomikroskooppinäytteestä kuvatusta diasta digitoititietojen avulla muodostettu *epäsymmetrinen malli*. Laaditut mallit on esitetty kuvassa 16. Malleissa näkyy efektiivisten huokosaukkojen sijainti. Neliömallissa aukot sijaitsevat soluseinän alalaidassa.

Neliömalli ja kennomalli ovat suorakulmaisessa koordinaatistossa olevia malleja. Epäsymmetrinen malli sijaitsee polaarisisä koordinaatistossa. Ero suorakulmaiseen koordinaatistoon on kuitenkin hyvin pieni, koska malli on hyvin pieni ja epäsymmetrinen sekä dimensioidut ovat pieniä radiaali- ja tangentialsuunnissa verrattuna etäisyyteen ytimeästä. Epäsymmetrisessä mallissa on huomioitu laajentamismahdollisuus kopiaamalla ja peilaamalla.





Kuva 16. Mallien geometriset muodot. Ylinnä neliömalli, keskellä kennomalli ja alinna epäsymmetrinen malli. Mittakaava on 1:750e-3.

#### 5.1.1 Kosteuden diffuusioreitit solutasolla

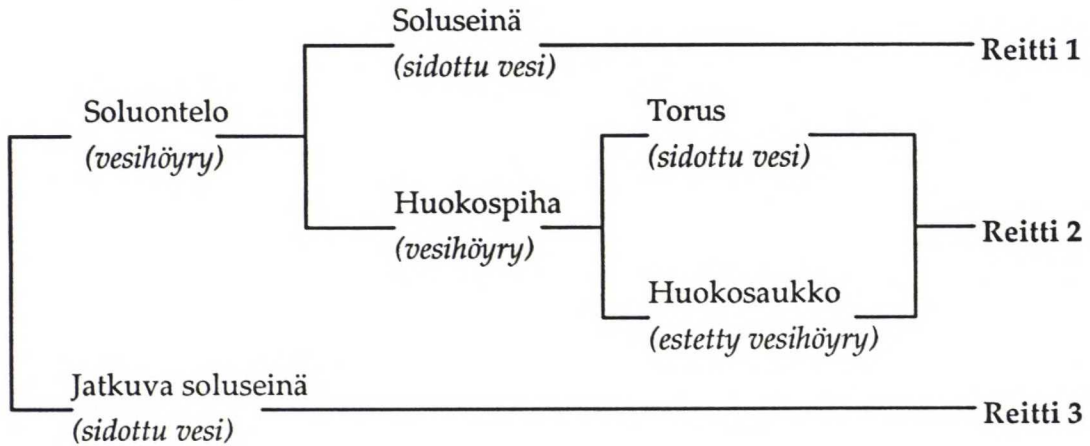
Kosteuden diffuusiassa yhdistetään kaksi erityyppistä diffuusiota. Soluonteloiden ja huokosten läpi kosteus siirtyy vesihöyrynä. Soluseinän läpi kosteus siirtyy sidottuna vetenä. Stamm (1964) on esittänyt kosteuden siirtymisestä puun läpi kolme eri diffuusioreittiä. Diffuusioreitit on esitettyä kuvassa 17.

**Reitti 1. Soluontelo - soluseinä:** Vesihöyry diffundoituu soluonteloiden läpi sarjassa epäjatkovien soluseinien läpi tapahtuvan sidotun veden diffuusion avulla.

**Reitti 2. Soluontelo - huukonen:** Vesihöyry diffundoituu soluonteloiden läpi sarjassa huukospihan läpi tapahtuvan vesihöyryn diffuusion kanssa ja sarjassa 1) huukoskalvon

aukkojen läpi tapahtuvan vesihöyryn diffuusion kanssa tai 2) toruksen läpi tapahtuvan sidotun veden diffuusion kanssa.

**Reitti 3. Jatkuva soluseinä:** Sidottu vesi diffundoituu soluseinän jatkuvan osan läpi.



Kuva 17. Kosteuden diffuusioreitit puussa.

Stammin mukainen eri diffuusioreittien osuus koko diffuusiosta on esitetty taulukossa 12. Stammin (1964) mukaan diffuusion pääreitteinä on diffuusioreitti *soluontelo - soluseinä*.

Taulukko 12. Eri diffuusioreittien osuus koko diffuusiosta (Stamm 1964).

Lämpötila [°C]	Suht. kuiva- tuoretiheys	Diffuusioreitin osuus [%]		
		Reitti 1	Reitti 2	Reitti 3
50	0,2	95	4,2	0,8
	0,4	86	10,1	3,9
	0,8	55	22,2	22,8
120	0,2	94	5,3	0,7
	0,4	85	11,7	3,3
	0,8	57	24,8	18,2

Vesihöyryn diffuusion ollessa huomattavasti nopeampaa kuin sidotun veden diffuusion, kasvaa reitin *soluontelo - huokonen* merkitys tutkittaessa puun Fickin lain vastaista diffuusiokäyttäytymistä. Vesimolekyylin suuruus on noin 0,14 nm. eli noin 0,2 % margon reikien suuruudesta.

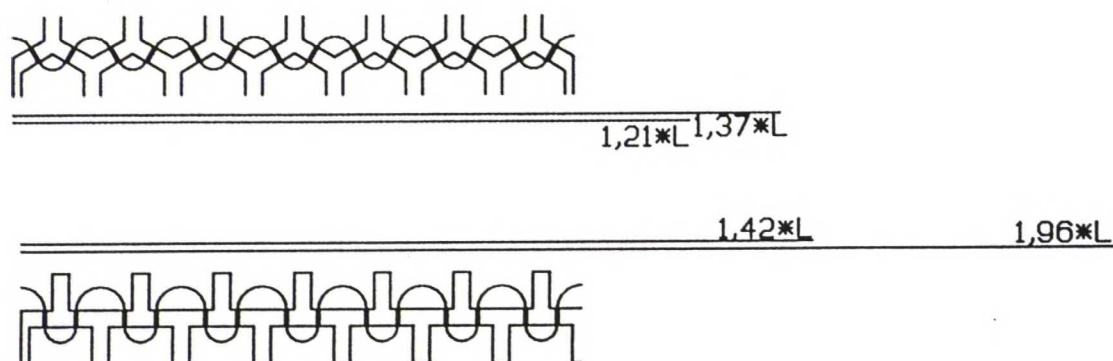
Täten kosteus pystyy hyvin siirtymään aspiroitumattoman huokosen sulkukalvon lävitse vesihöyrynä. Toruksen paksuuden ollessa noin 10 % soluseinän paksuudesta voidaan jopa aspiroituneenkin huokosen olettaa olevan nopein reitti kosteuden siirtymiselle seuraavaan soluonteloon. Seuraavassa soluontelossa huokosen kautta kulkeutunut vesihöyry leviää soluonteloon ja alkaa kostuttaa soluseiniä sekä siirtyy huokosten kautta edelleen seuraaviin soluihin. Jos kosteuden siirtymisen voidaan olettaa toimivan edellä esitetyllä tavalla, pitäisi soluonteloiden kosteuspitoisuuden olla alussa suuremman kuin soluonteloiden välillä sijaitsevan soluseinän. Samalla korostuu myös mallin geometrian merkitys kosteuden siirtymiseen. Näin ideoidun kosteuskäyttäytymisen voidaan olettaa riippuvan reitin *soluontelo-huokonen* nopeudesta ja pituudesta verrattuna reittiin *soluontelo - soluseinä*.

#### 5.1.2 Geometrian vaikutus kosteuden siirtymisen reitin pituuteen

Tutkimuksessa kosteuden siirtymisen reittien pituuksien vaikutusta diffuusiokertoimeen on pyritty vähentämään solukennostojen geometrioiden avulla. Malleissa tarkasteltiin säteen suuntaista kosteuden siirtymistä. Kun kosteus siirtyy solujen välillä säteen suuntaisilla soluseinillä sijaitsevien huokosaukkojen kautta, on siirtymisreitti mutkitteleva. Kuusikulmiomallilla lyhennetään mutkittelevan reitin pituutta. Kuvassa 18 on vertailtu kuusikulmaisen kennomallin ja vastaavan neljäkulmaisen mallin virtausreittien *soluontelo - huokonen* pituutta. Nelikulmaisella mallilla on sama soluontelon säteen suuntainen leveys kuin kuusikulmaisella kennomallilla. Kummallakin mallilla on lisäksi sama tiheys ja soluontelon pinta-ala.

Toinen huomattavasti vaikuttavampi tekijä on reitin *soluontelo - soluseinä* hitaus verrattuna reittiin *soluontelo - huokonen*. Hitautta voidaan kasvattaa lisäämällä soluseinän paksuutta ja pienentämällä soluonteloita. Neliömallissa reitin *soluontelo - huokonen* nopeutta kasvatettiin suurentamalla säteen suuntaisia soluonteloita.





Kuva 18. Geometrian vaikutus virtausreitin pituuteen. Kuvan yläosassa kennomalli. Kennomallin alapuolella palloaallon muotoisen sekä suoraviivaisen kosteuden siirtymisreitin pituudet. Alaosassa kuvaa vastaava suorakulmainen malli. Suorakulmaisen mallin yläpuolella ylinnä suoraviivaisen kosteuden siirtymisreitin ja alempana palloaallon muotoisen kosteuden siirtymisreitin pituudet.

Kuvassa 18 on vertailtu huokosaukkojen kautta tapahtuvaa kosteuden leviämistä palloaallon muotoisesti ja suoraviivaisesti. Palloaallon tapauksessa kosteuden siirtymisreitin pituudeksi soluontelossa on laskettu vierekkäisten huokosaukkojen välisten ympyrän kaarien pituuksien ja huokosaukon pituuksien yhteinen matka. Kaarevan reitin pituudeksi tuli kennomallissa  $202,1 \mu\text{m}$ :ä ja suorakaiteen muotoisessa mallissa  $288,1 \mu\text{m}$ :ä. Suoraviivaisessa tapauksessa kosteuden on oletettu leviävän huokosaukosta suoraan seuraavaan huokosaukkoon. Suoraviivaisen, kulmikkaan reitin pituudeksi saatiin kennomallissa  $177,8 \mu\text{m}$ :ä ja suorakulmaisessa mallissa  $208,6 \mu\text{m}$ :ä. Vertailussa havaitaan reitin soluontelo - huokonen olevan molemmilla arviointitavoilla lyhyempi kennomallissa kuin vastaavassa suorakulmaisessa mallissa.

Eri osa-aineiden kosteuspitoisuuserot ovat voimakkaimmillaan mallin korkeampaa kosteuspitoisuutta lähellä olevissa soluissa. Viimeisissä soluissa kosteudenvirtausreittiä ei välttämättä voida niin helposti havaita. Myös huokosaukon virtausvastuksen merkitys kosteuden siirtymiseen voi muodostua ensimmäisten soluonteloiden jälkeen merkittäväksi. Suurella virtausvastuksella vesihöyry täyttää ensin soluontelon ja vasta tämän jälkeen kosteus leviää seuraavaan huokosaukkoon. Huokosaukon vaikutusta virtausvastukseen tutkittiin aspiraatioasteiden vaihteluilla.

## 5.2 Huokosaukon efektiivisen koon mallintaminen

Mallin säteen suuntaisilla seinillä on elementtiverkossa tihentymä, jonka materiaaliominaisuuksia muuttamalla kuvattiin eri aspiroitumisasteessa olevia kaksipihaisia rengashuokospareja. Mallissa olevaa efektiivistä huokosaukon kokoa voidaan säätää aukon diffuusiokerrointa muuttamalla. Aspiroitumattomassa efektiivisessä huokosaukossa käytettiin ilman diffuusiokerrointa. Kun mallien huokosten katsottiin olevan 100 %:sti aspiroituneita, mallissa käytettiin aukoissa soluseinän diffuusiokerrointa.

Koko aukon diffuusiokerrointa muutettiin kytkemällä rinnan halutun efektiivisen huokosaukon levyinen diffuusiokerroin ja koko aukosta soluseinäksi muuttuvan osuuden diffuusiokerroin. Rinnan kytkennässä käytettiin hyväksi Ohmin lain analogiaa Fickin I:een lakiin:

$$R = \frac{U}{I} \quad (29)$$

$R$  = vastus [ $\Omega$ ]

$U$  = jännite [V]

$I$  = sähkövirta [A]

joka on kosteuden siirtymisessä muodossa:

$$Z = \frac{\Delta c}{g} \quad (30)$$

$Z$  = kosteuden vastus  $\left[ \frac{s}{m} \right]$

$\Delta c$  = kosteuspitoisuuden muutos  $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

$g$  = kosteusvirran tiheys  $\left[ \frac{kg}{m^2 s} \right]$

Kosteusvirran tiheys voidaan ilmaista Fickin I:n lain muodossa (kaava 5), ja sijoittaa kaavaan 30. Tällöin saadaan kosteuden vastukselle yleinen muoto:

$$Z = \frac{\Delta x}{D_c} \quad (31)$$

$\Delta x$  = diffuusiomatka [m]

Rinnankytkennässä huokosaukon efektiivinen kokonaisvastus lasketaan yhdistämällä aukon kosteuden vastus ja soluseinäksi muuttuvan osuuden kosteuden vastus:

$$\frac{1}{Z_{\text{eff}}} = \frac{1}{Z_{a-\text{eff}}} + \frac{1}{Z_a} \quad (32)$$

Kosteusvirran suuruuteen vaikuttaa kosteusvirran läpäisemä pinta-ala. Diffuusiomatka on kaikissa tapauksissa soluseinän paksuinen, joten se voidaan jättää huomioimatta. Huomioimalla edellinen ja sijoittamalla kaavan 30 mukaiset eri materiaalien arvot kaavaan 32 saadaan:

$$D_{c,\text{eff}} L_{\text{eff}} = D_{c,s} L_{a-\text{eff}} + D_{c,\text{air}} L_a \quad (33)$$

josta saadaan:

$$\Rightarrow D_{c,\text{eff}} = \frac{D_{c,s} L_{a-\text{eff}} + D_{c,\text{air}} L_a}{L_{\text{eff}}} \quad (34)$$

$D_{c,\text{eff}}$  = huokosaukon efektiivinen diffuusiokerroin  $\left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$

$D_{c,s}$  = kiintoaineeksi muuttuneen osuuden diffuusiokerroin  $\left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$

$L_{a-\text{eff}}$  = kiintoaineeksi muuttuneen osuuden leveys [m]

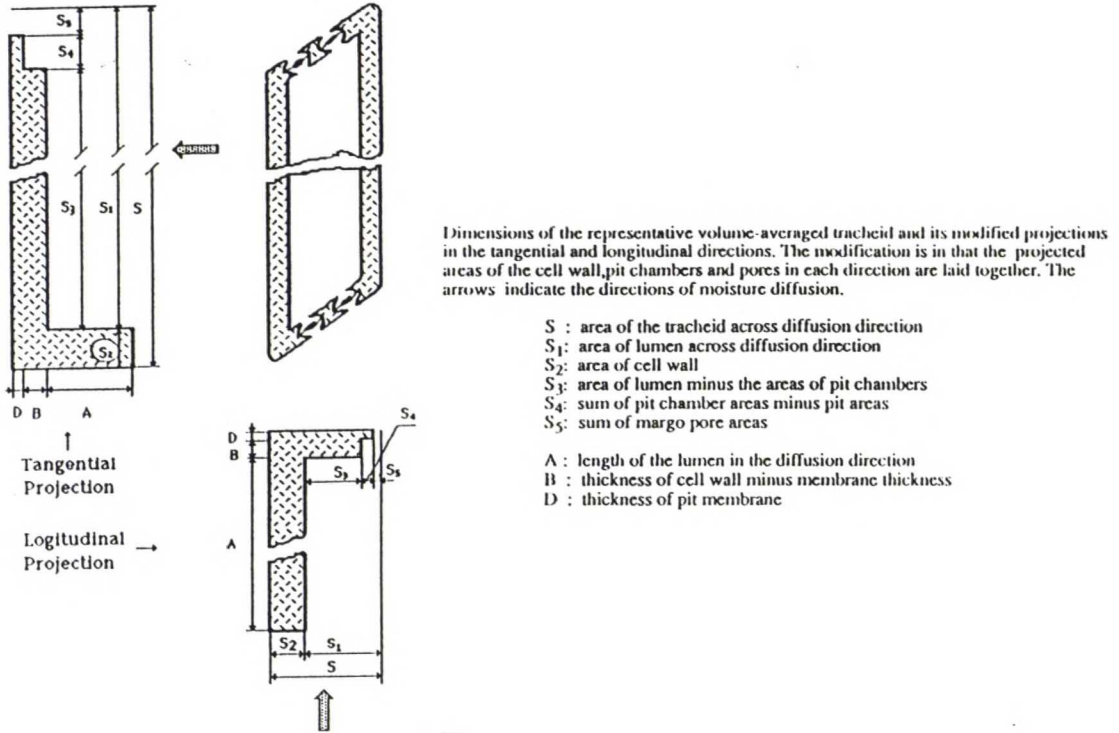
$D_{c,\text{air}}$  = ilman diffuusiokerroin  $\left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$

$L_a$  = aukon leveys [m]

$L_{\text{eff}}$  = efektiivisen aukon leveys [m]



Efekiivinen huokosaukon leveys trakeidissa laskettiin samalla menetelmällä kuin Liu (1988).



Kuva 19. Huokosaukon efekiivisen alan laskenta. (Liu 1988)

Efekiivisen huokosaukon koko muodostuu trakeidin säteen suuntaisen seinän aukkojen summasta jaettuna trakeidin pituudella. Aukkojen summa saadaan keskimääräisestä huokosten lukumäärästä säteen suuntaiselle seinälle. Huokosten pinta-alasta vähennetään toruksen ala ja arvioitu margon reikäisyys. Liu (1988) käytti mallissaan ohuempaa soluseinänpaksuutta kuvaamaan toruksen ja margon osuutta soluseinässä. Tongin mallissa jää pieni aukko ( $S^5 \cdot D$ ) ja lisäksi kerros jossa huomioidaan toruksen paksuus ja halkaisija ( $S^4 \cdot B$ ). Tässä mallissa toruksen ja margon vaikutusta kuvaava alue ( $S^4 \cdot B$ ) vähennettiin efekiivisen huokosaukon koosta lisäämällä pinta-alaltaan samansuuruinen alue soluseinän osuuteen. Toruksen huomioiminen omalla soluseinän ohennetulla osalla aiheuttaisi tiheämmän elementtiverkon ja laskentaan lisää kuormitusta.

### 5.2.1 Trakeidien ominaishuokoisuus

Jokaisessa mallissa muodostettiin erilaisia efektiivisiä huokosaukkoja. Perusmallina käytettiin täysin aspiroitumatottomia huokosia joiden dimensiot sovitettiin trakeideihin. Trakeidien mitoista tarvittiin trakeidin leveyttä säteen ja tangentin suunnassa sekä trakeidin pituutta. Huokosaukon huokoisuuden määrittelevistä mitoista tarvittiin huokospihan suuruutta, margon reikien lukumäärää ja kokoa sekä toruksen alaa. Malleissa käytetyt dimensiot on esitetty taulukossa 13.

*Taulukko 13. Trakeidin rakenteelliset dimensiot. Yksikkönä on  $\mu\text{m}$ .*

	Neliö	Kenno	Epäsymm.
Soluseinän paksuus ( $S_2$ )	5	2.2	2.85
Huokosaukon halkaisija	8.4	9	14
Toruksen halkaisija	3.3	3.8	7
Margon reikien halkaisija	0.5	0.5	0.3
Solun leveys, tangentin suunt. (A)	12.5	16.6	46.36
Solun leveys säteen suunt. ( $S_1$ )	12.5	21.96	21.2
Toruksen paksuus	0.28	0.25	0.21
Huokosten lukumäärä	50	130	220
Reikien lukumäärä margossa	50	170	400
Trakeidin pituus	3150	2850	2820

Edellisen taulukon trakeidien dimensioiden ja anatomiatietojen avulla laskettiin eri ominaishuokoisuuksien arvoja. Margon huokoisuutena käytettiin Thomasin (1967) esittämän margon huokoisuuden vaihteluvälille sopivia arvoja. Margon huokoisuus jää neliömallissa ja epäsymmetrisessä mallissa huomattavan pieneksi.

*Taulukko 14. Mallien trakeidien ominaishuokoisuuden arvoja [%].*

	Neliö	Kenno	Epäsymm.
Poikkileikkaus $P_{\text{ontelo/trakeidi}}$	36	65	73
Pituusleikkaus $P_{\text{huokoset/trakeidi}}$	1.8	4.2	8.9
$P_{\text{margon reiät/margo}}$	20.9	63.9	24.5
$P_{\text{margon reiät/huukonen}}$	18.4	52.4	18.4
$P_{\text{margoien reiät/trakeidi}}$	0.3	2.2	1.6

Neliömallissa, jonka voidaan katsoa edustavan lähellä vuosiluston rajaa olevia kesäpuun soluja, huokosaukkojen lukumäärä vastaa lähes trakeidien maksimihuokoisuutta. Neliömallissa huokosaukot ovat jakautuneet kahdelle eri seinälle ja muissa malleissa neljälle seinälle. Epäsymmetrisessä mallissa huokosaukkojen lukumäärä trakeidissa on lähellä normaalia kevätpuusolun huokosaukkojen lukumäärää. Samoin kennomallin huokosaukkojen lukumäärä vastaa lähes varhaisen kesäpuusolun huokosaukkojen lukumäärää. Kaikissa malleissa kahdella seinällä ei ole huokosaukkoja.

### 5.2.2 Efektiivinen huokosaukon koko

Huokosaukkojen efektiivinen pinta-ala on kuvattu soluseinässä raolla, jonka leveys kuvaa huokosaukkojen dimensioita ja aspiroitumista. Malleissa käytetyistä aspiroitumattoman huokosen efektiivistä huokosaukon leveyttä kuvaava arvo saadaan arvon "margojen reikien pinta-alan suhde trakeidin pinta-alaan" avulla. Edellä mainittu suhde kerrotaan säteen ja tangentin suuntaisen sivun pituudella ja saadaan "margojen reikien pinta-alan suhde trakeidin pituuteen". Lisäksi lisätään trakeidin pituudelle jaettu toruksen pinta-ala trakeidin pituudelle jaetulle soluseinän pinta-alalle. Laskentataulukko efektiivisen huokosaukon muodostumisesta on esitetty liitteessä G. Aspiroitumattoman efektiivisen huokosaukon leveydet on esitetty taulukossa 15.

-

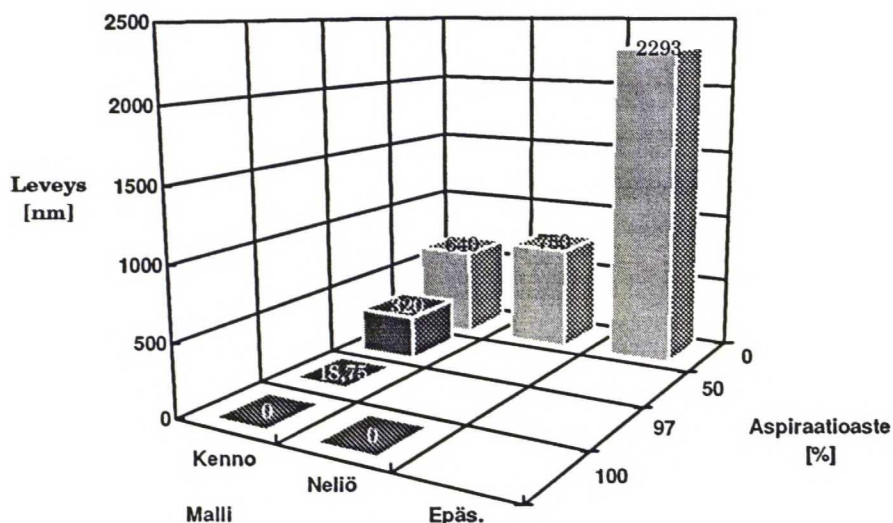
*Taulukko 15. Efektiivisen huokosaukon leveys [ $\mu\text{m}$ ].*

Malli	Neliö	Kenno	Epäsymm.
Leveys	0.75	0.64	2.29

Neliömallissa mallinnuksessa käytettiin hyväksi symmetriaa, tällöin mallissa käytetty leveys oli vain puolet efektiivisestä huokosaukon leveydestä. Efektiivisen huokosaukon pinta-alaosuudeksi soluseinästä, jolla huokosaukko sijaitsee, tuli neliömallissa 5 %, kennomallissa 7,6 % ja epäsymmetrisessä mallissa 9,9 %.



Eri malleissa vaihdeltiin efektiivisten huokosaukkojen alaa. Huokosaukon efektiivisen alan vaihtelulla mallinnetaan aspiraatioasteen vaihtelua huokosaukossa. Eri malleilla lasketut aspiraatioasteet on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Malleilla lasketut aspiraatioasteet ja efektiivisen huokosaukon leveys.

Kuvassa näkyy eri mallien aspiraatioastetta vastaava efektiivisen huokosaukon leveys. Efektiivisen huokosaukon diffuusiokerroin on laskettu kaavalla 34. Mallissa oletetaan aspiraation vaikutuksen olevan sama, kuin jos aspiraatioastetta vastaava huokosten lukumäärä puuttuisi taulukossa 13 esitetyistä mallin alkuperäisestä anatomiasta. Aspiraatioasteen ollessa 100 % kaikki huokokset ovat aspiroituneet ja soluseinässä ei ole huokosaukkoja. Kennomallissa laskettiin myös aspiraatioasteen 97 % vaikutusta kosteuden siirtymiseen. Tällöin mallissa on vain yksi kaksipihainen rengashuokonen. Kun mallin aspiraatioaste on 50 % puolet 60:stä huokosesta on suljettuina.

### 5.3 Huokosmallien materiaaliominaisuudet ja dimensiot

Laskentamallien materiaaliominaisuudet valittiin soluseinän materiaaliominaisuuksien osalta vastaamaan aikaisempien vertailulaskelmien soluseinän materiaaliominaisuuksia. Tällöin tarkastelulämpötilana on 12 °C. Neliömallin osalta soluseinän diffuusiokerroin ja kapasiteetti valittiin vastaamaan Koposen differenssimenetelmään perustavalla HEAT2-ohjelmalla laskemia saman neliömallin kosteuden siirtymisen laskentaesimerkkejä. Laskennat käsittelevät samankaltaista ongelmaa kuin tämä tutkimus (Absetz et al 1994). Neliömallin osalta tarkastelulämpötilana käytettiin 20 °C. Käytetyt materiaaliominaisuudet ja reunaehdot on koottu taulukkoon 16.

*Taulukko 16. Mallien materiaaliominaisuudet ja reunaehdot.*

Parametri		Neliö	Kenno	Epäsymm.
Tiheys:	soluseinä [kg/m <sup>3</sup> ]	1500	1500	1500
	soluontelo [kg/m <sup>3</sup> ]	1.2	1.2	1.2
Diffuusiokerroin:	soluseinä [m <sup>2</sup> /s]	4.34e-8	8.4e-8	8.4e-8
	soluontelo [m <sup>2</sup> /s]	2.55e-5	2.55e-5	2.55e-5
Kapasiteetti:	soluseinä [ ]	12500	26400	26400
	soluontelo [ ]	1	1	1
Pinnansiirtokerroin [m/s]		2	2	2

Taulukossa 16 potentiaalina on ilman vesihöyrypitoisuus. FEM-laskennassa materiaaliominaisuudet pitää muuttaa lämmönjohtumisen laskenta-analogialle sopivaan muotoon. Laskentamallit laadittiin siten, että perusmittayksikkönä oli millimetri. Myös materiaaliominaisuuksien ja reunaehtoien yksiköt tulee muuntaa SI-yksiköistä muotoon jossa mittayksikön perusyksikkönä on metrin asemasta millimetri.

Neliö- ja kennomallissa tutkittiin kosteudensiirtymistä malleissa kahdella eri puolipaksuudella. Laskennoissa käytetyt eri mallien puolipaksuudet on esitetty taulukossa 17.

Taulukko 17. Laskentamalleissa käytetyt puolipaksuudet [ $\mu\text{m}$ ].

Malli	Neliö	Kenno	Epäsymm.
1. puolipaksuus	75	42	180
2. puolipaksuus	150	147	-

Puolipaksuuden vaihtelulla tutkittiin mallin kokovaikutusta diffuusiokertoimeen. Samalla puolipaksuuden vaihtelulla pyrittiin varmistamaan huokosaukon vaikutusta kosteuden siirtämistä nopeuttavana tekijänä. Malleissa pyrittiin vertailtavuuden vuoksi lähelle ohuinta käytettävissä olevaa kuusesta sorvatus viilun nimellispaksuutta, mikä oli 0,15 mm:ä.

Mallien dimensioiden valittiin solurakenteen idealisoinnin ja todellisten dimensioiden yhdistelyllä. Jokaisen mallin dimensioita käsitellään erikseen seuraavissa kappaleissa.

### 5.3.1 Neliömalli

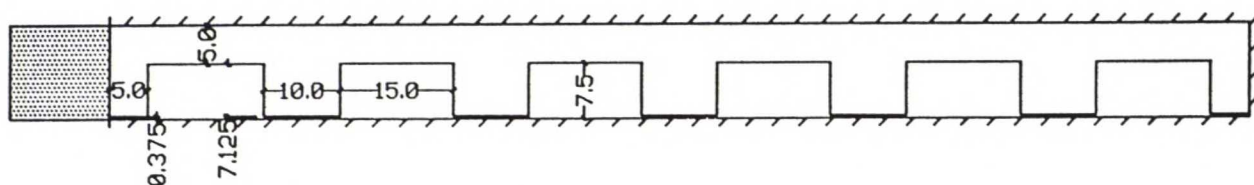
Neliömallissa solukennosto muodostuu neliön muotoisista soluseinäkennoista. Neliöden sisällä on neliön muotoinen soluontelo. Solut edustavat kesäpuun viimeisiä soluja ennen vuosikasvun rajaa. Soluontelot olivat säteen suunnassa 15  $\mu\text{m}$ :ä eli noin 3.5 kertaa keskimääräistä suurempia. Tangentin suunnassa soluontelot olivat 35 % normaalia pienempiä. Soluseinän paksuutena oli 5  $\mu\text{m}$ :ä, mikä on lähellä keskimääräistä kesäpuun soluseinäpaksuutta (n. 4,5  $\mu\text{m}$ :ä).

Solujen tangentin suuntaisilla seinillä sijaitsevat efektiiviset huokosaukot. Malleissa efektiivisen huokosaukon leveys oli joko 0 tai 750 nm. Aukot sijaitsevat seinien puolivälissä ja aukon keskikohta rajoittuu symmetria-akseliin. Mallin huokoisuuteen vaikuttavat rakenteelliset dimensioiden on esitetty taulukossa 13. Malliin valittiin normaalia kesäpuusolua huomattavasti enemmän rengashuokosia. Suurella efektiivisellä huokosaukolla pienennetään huokosaukon virtausvastusta. Suuri efektiivinen huokosaukko lisää reitin *soluontelo* - *huokonen* osuutta kokonaiskosteusvirrasta. Samanaikaisesti lähes normaalin paksuinen



soluseinä vähentää reitin *soluontelo* - *soluseinä* suhteellista osuutta kokonaiskosteusvirrasta. Suuri säteen suuntainen soluontelo nopeuttaa kosteuden siirtymistä soluonteloissa ja kasvattaa reitin *soluontelo* - *huokospiha* osuutta.

Neliömalli laskettiin kahdella eri puolipaksuudella. Ensimmäinen puolipaksuus koostui kolmesta solusta ja toinen kuudesta solusta. Kuvassa 21 on esitetty mallin rakenne.



Kuva 21. Kuusisoluisen neliömallin rakenne. Mallin vasemmassa laidassa on kuvattuna pinnansiirtokertoimen suuruus muutettuna vastaavaksi ilmakerrokseksi. Efektiiviset huokosaukot ovat erittäin pieninä tangentin suuntaisten seinien alaosaissa. Mitat on mikrometreissä.

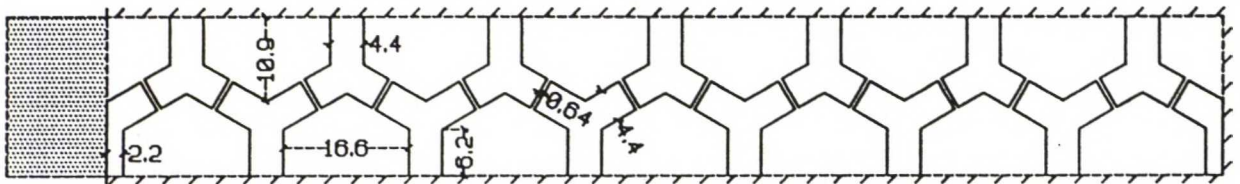
Efektiivisen huokosaukon ollessa täysin aspiroitunut puuttuvat mallista kuvan alalaidassa olevat aukot. Tangentin suuntaiset soluseinät on jaettu neljään säteen suuntaiseen elementtiin samoin efektiivinen huokosaukko. Kuvassa näkyvät mallille annetut reunaehtojen sijainnit suljettuina reunoina. Käytetyn pinnansiirtokertoimen arvo vastaa  $13 \mu\text{m:n}$  ilmakerroksen kosteuden siirtymisen vastusta.

### 5.3.2 Kennomalli

Kennomallia voidaan pitää tämän työn tärkeimpänä mallina. Mallin solut muodostuvat symmetrisistä kuusikulmiosta. Solun tiheys on  $529 \text{ kg/m}^3$ . Solu vastaa tiheydeltään kuusen varhaisen kesäpuun solua. Soluseinän paksuus on  $2.2 \mu\text{m}$ :ä, eli vain puolet keskimääräisestä kuusen kesäpuun soluseinän paksuudesta. Solun tangentiaalinen halkaisija vastaa keskimääräistä kuusen kesäpuun tangentiaalista halkaisijaa. Solun säteen suuntainen halkaisija on keskimääräisen kesäpuun ja kevätpuun

solunhalkaisijan väliltä. Solua voidaan pitää kuusen varhaisen kesäpuun soluna.

Malleissa on huokosaukot säteen suuntaisilla soluseinillä. Huokosaukkojen sijainnin vuoksi kennomalleissa on sijoitettu kaksi päällekkäistä solukerrosta limittäin. Solut on kuvattu symmetria-akselistaan puolikkaina. Pienempi malli rakentuu kahdesta kokonaisesta peräkkäisestä solusta, jolloin puolipaksuudeksi tulee 42  $\mu\text{m}$ :ä. Suuremmassa mallissa peräkkäisiä soluja on kaikkiaan seitsemän. Tällöin puolipaksuudeksi tulee 147  $\mu\text{m}$ . Kuvassa 22 on esitetty mallin rakenne ja reunaehtojen sijainnit.



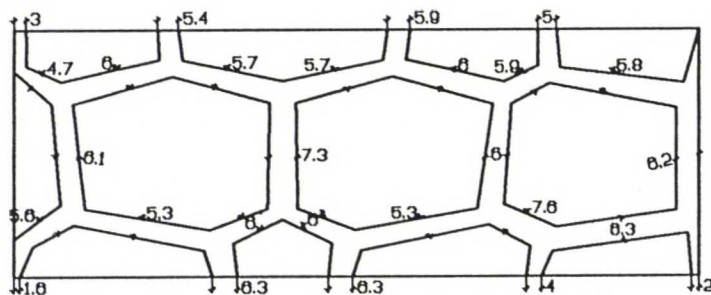
Kuva 22. 14-soluisen kennomallin rakenne. Efektiiviset huokosaukot näkyvät säteen suuntaisten seinien puoliväleissä. Mitat on mikrometreissä.

Mallin efektiivinen huokosaukko muodostettiin normaalista varhaisen kesäpuusolun rengashuokosten lukumäärästä. Kaksipihaiset rengashuokokset ovat jakautuneet tasaisesti kaikille neljälle säteen suuntaiselle seinälle. Mallilla tutkittiin eri aspiraatioasteita. Aspiraatioasteita muutettiin efektiivisen huokosaukon avulla.

Mallin virtausreitistä tehtiin mutkitteleva. Mutkittelevalla reitillä tarkastellaan rengashuokosten ja soluseinän kautta kulkevan soluonteloiden välisen kosteusvirran etenemistä. Aspiraatioasteen ollessa 50 % rengashuokosten lukumäärän voidaan olettaa olevan puolet normaalista. Tässä tapauksessa avointen rengashuokosten lukumäärä vastaa paremmin solun dimensioita. Samalla saadaan myös eri virtausreittien suhteet lähemmäksi normaalia kuusen varhaisen kesäpuun solua.

### 5.3.3 Epäsymmetrinen malli

Epäsymmetrinen malli edustaa kuusen kevätpuun solukkoa. Mallin keskellä sijaitsevat solut ovat pinta-alaltaan suuria varhaisen kevätpuun soluja. Ylä- ja alalaidassa sijaitsevat solut ovat melko pieniä varhaisen kevätpuun soluiksi. Solujen keskimääräiset säteen ja tangentin suuntaiset halkaisijat ovat hyvin lähellä taulukossa 1 esitettyjä kuusen kevätpuun trakeidin läpimittoja. Ylä- ja alalaidassa olevat pienet soluontelot kasvattavat solukon tiheyden  $404 \text{ kg/m}^3$ . Tiheydeltään solukko vastaisi myöhenpää kevätpuuta. Mallin soluseinän paksuuden sekä soluonteloiden suuruuden vaihtelu tulee esille kuvasta 23. Malli on muodostettu kuvassa 3 esitetystä kuusen solukosta valitsemalla soluryhmä joiden dimensioita on muutettu symmetrisemmiksi niin, että mallia voidaan peilaamalla kasvattaa.



Kuva 23. Soluseinien paksuuden vaihtelu epäsymmetrisessä mallissa.

Soluseinänpaksuuden keskiarvo säteen suuntaisilla seinillä on  $2.925 \mu\text{m}$ :ä ja tangentin suuntaisilla seinillä  $2.758 \mu\text{m}$ :ä. Soluseinänpaksuudet ovat taulukossa 2 esitettyjä kevätpuun keskimääräisiä soluseinänpaksuuden arvoja pienemmät. Mallin muut dimensiot on esitetty liitessä H.

Mallin rengashuokosten lukumäärä on keskimääräistä hieman korkeampi. Margon huokoisuus on noin 25 %, eli melko alhainen. Efektiivisen huokosaukon leveydeksi saadaan noin 10 % keskimääräisestä säteen suuntaisesta soluseinän pituudesta. Efektiivisen huokosaukon leveys on kaikilla soluilla yhtä suuri.

Mallilla tarkkaillaan kosteuden siirtymisreittien riippuvuutta soluonteloiden koosta ja vaihtelevasta soluseinän paksuudesta. Suurien onteloiden voidaan olettaa olevan erittäin nopeita kosteuden



siirtymisreittejä. Efektiivisen huokosaukon virtausvastus ja soluseinän suuri kosteudensitomiskapasiteetti hidastavat kosteuden siirtymistä pieniin soluonteloihin sekä seuraavaan suureen soluonteloon. Pienellä kevätpuun soluontelolla pyritään korostamaan aspiroitumattomien huokosaukkojen kautta kulkevan mutkittävän reitin kosteudensiirtokykyä, joka kostuttaa [m/s] soluseinää molemmilta puolilta.

## 6 PUUN SOLURAKENTEEN KOSTEUDEN SIIRTYMISEN LASKENTATULOKSET

Ensisijaisena tarkoituksena oli laskea diffuusiokertoimet kaikille laskentamallien tapauksille. Diffuusiokerroin ilmoittaa kappaleen paksuudella vallitsevan kosteusvirran tiheyden ja kosteuseron suhteen. Suhdetta voidaan kutsua myös kosteuden läpäisevyydeksi. Stationaaristen ja epästationaaristen laskentatapausten diffuusiokerrointen avulla voidaan tutkia mallin Fickin lain vastaisuutta. Epästationaarisella laskennalla simuloitiin sorptiokokeen kosteuspitoisuuden muutosta alkukosteuspitoisuudesta toiseen vallitsevaan kosteuspitoisuuteen. Stationaarisella laskennalla simuloitiin kuppikoetta.

Mallien kosteuspitoisuuksien muutokset laskettiin UNIX-ympäristössä toimivalla tietokoneella. Eri laskentamalleja puun solurakenteella oli epästationaarisissa tapauksissa 12 ja stationaarisissa tapauksissa 25. Kaiken kaikkiaan varsinaisia, varmistavia ja vertailevia malleja oli puun solurakenteesta yhteensä yli 45 kappaletta. Mallit jouduttiin laskemaan tulosten jälkikäsitteilyn vuoksi useissa osissa. Kirjattuja laskenta-ajoja on 93 kappaletta. Lisäksi alussa tehtiin kymmeniä ajoja, joiden avulla testattiin ohjelman käyttömahdollisuuksia. Ajojen kestoajat vaihtelivat 20 s:sta yli 50 tuntiin. Kokonaisuudessa voidaan arvioida tietokoneen pelkästään laskeneen yli 31 vuorokautta. Laskenta-aikaa kasvatti mm. mallien suuri elementtien lukumäärä. Suurimmissa malleissa oli yli 14000 elementtiä. Tarvittavien tulosten kerääminen tulostiedostosta oli nopeinta tehdä käsin. Tulosten jälkikäsitteilyssä on käytetty taulukkolaskentaohjelmaa. Kirjatut laskenta-ajot on esitetty liitteessä I.

Diffuusiokerrointen selvittämiseksi laskettiin materiaalin kosteuden siirtymiseen liittyvistä laskentaparametreista kosteusvirran tiheys ja suhteellinen painonmuutos. Kosteusvirran tiheys on kosteuspitoisuuden muutoksen suhde ainekerroksen kosteuden vastukseen. Laskennan tuloksista piti pystyä vertailemaan stationaarisia ja epästationaarisia laskentatapauksia.

Kosteusvirran tiheys (g) saadaan laskennasta saatavien elementteihin kohdistuvien kosteusvirtojen (G) avulla, kaavan 23 mukaisesti.

Suhteellinen painonmuutos kuvaa tarkasteluajanhetkellä vallitsevaa kappaleen suhteellista kosteuspitoisuutta verrattuna tasapainotilaan. Hetkellisten kosteuskertymätietojen ( $m$ ) avulla saadaan kosteuskertymä ajan funktiona.

Kosteuskertymän lisäksi myös hetkellinen kosteuskertymä, suhteellinen painonmuutos, kosteusvirran tiheys, elementteihin kohdistuva kosteusvirta ja diffuusiokerroin voidaan esittää ajan funktioina. Laskentatulokset on usein havainnollisuuden ja paremman käytettävyyden takia esitetty ajan neliöjuuren funktioina.

Laskentatulosten virheellisyyttä kuvaa hetkellisen diffuusiokertoimen kuvaaja. Kuvaaja on muodostettu peräkkäisten aika-askelien kosteusvirran tiheyksien keskiarvon peruusteella. Kuvaaja esitetään koordinaatistossa, jossa x-akselina on ajan neliöjuuri ja y-akselina diffuusiokerroin. Kuvaaja on erittäin herkkä tarkasteluajavälin muutokselle. Onnistuneestakin suhteellisen painonmuutoksen kuvaajasta voi helposti tulla värähtelevä hetkellisen diffuusiokertoimen kuvaaja.

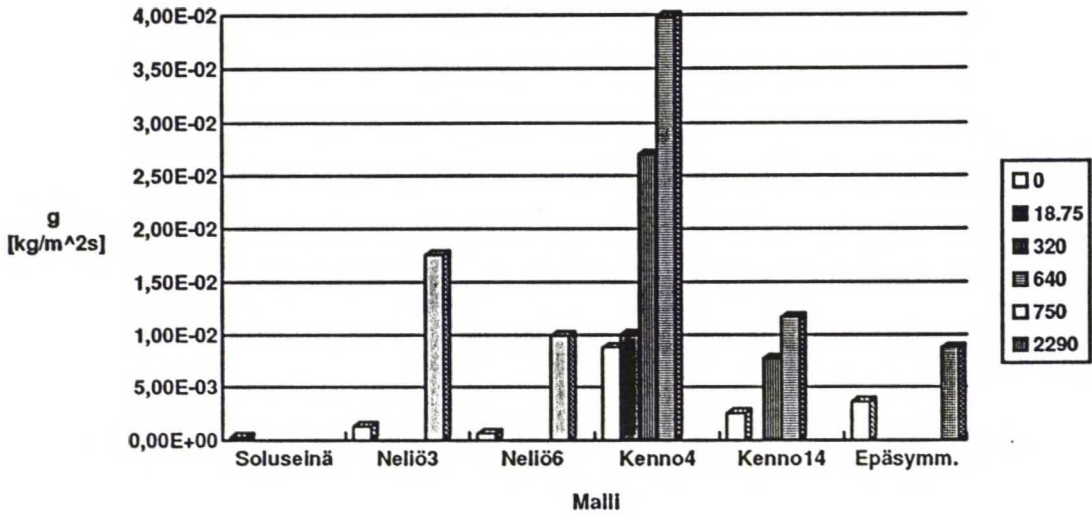
## 6.1 Kosteusvirta ja kosteusvirran tiheys

Stationaarisissa olosuhteissa kosteusvirran tiheys on vakio ajan ja paikan suhteen. Tuloksena saadaan kosteusvirta elementtiä kohden. Laskentatuloksista saaduista elementtikohtaisista kosteusvirroista muodostettiin kaavan 23 avulla kosteusvirran tiheyksiä. Elementtikohtaiset kosteusvirrat ja kosteusvirran tiheyden tarkat numeroarvot on esitetty liitteessä I. Kosteusvirroista muodostetut kosteusvirran tiheydet on koottu kuvaan 23. Stationaaritilan tarkasteluja tehtiin kaikilla laskentamalleilla.

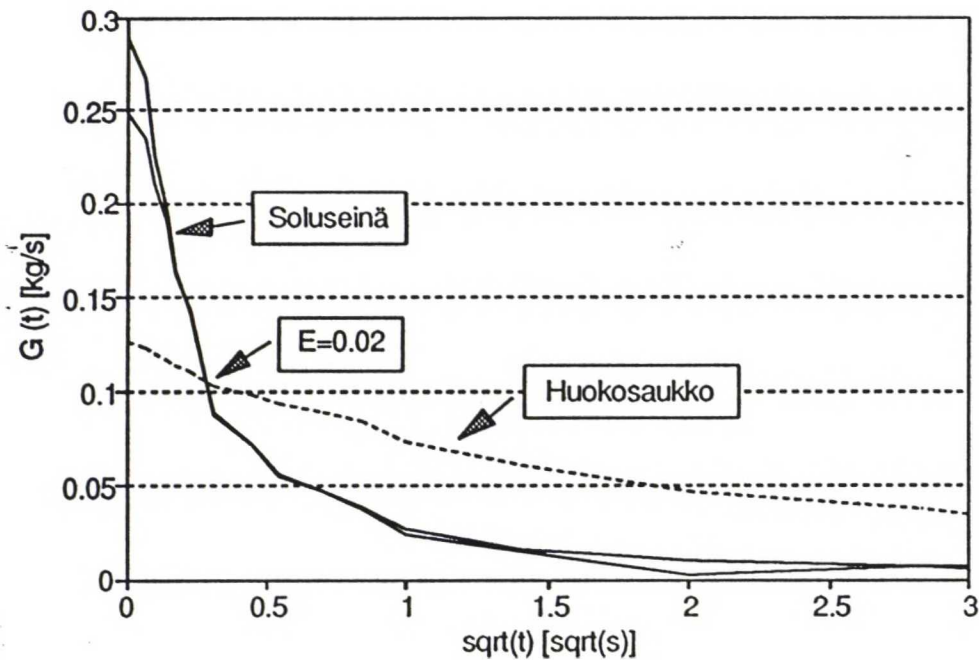
Epästationaaristen olosuhteiden tarkasteluissa kosteusvirta on ajan suhteen muuttuva. Kuvassa 24 on esitetty ajan neliöjuuren suhteen kolmisoluisen huokosaukollisen neliömallin epästationaaristen olosuhteiden kosteusvirran muuttuminen. Kuvassa on kaksi keskimmäistä soluseinä- ja huokosaukkoelementtiä. Kosteusvirta kohdistuu elementille.



Kosteusvirran tiheys on jatkuvasti suurempi efektiivisen huokosaukon elementeissä kuin soluseinäelementeissä.

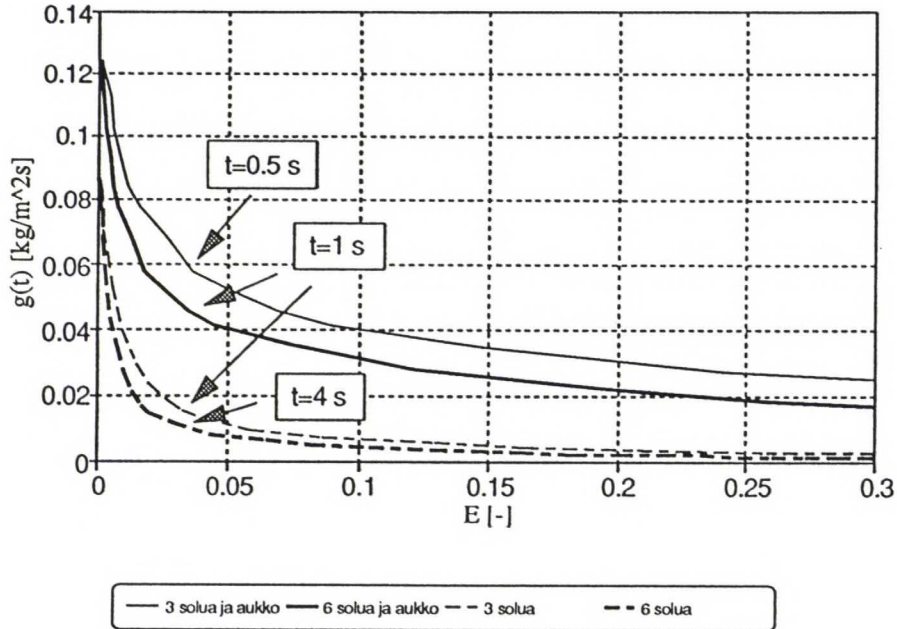


Kuva 23. Stationaaristen olosuhteiden kosteusvirran tiheydet. Numero mallin perässä ilmoittaa mallin puolipaksuudessa olleiden solujen lukumäärän. Selitteessä oleva luku ilmoittaa efektiivisen huokosaukon leveyden nanometreinä.



Kuva 24. Huokosaukollisen kolmisoluisen neliömallin elementtien kosteusvirrat ajan neliöjuuren funktiona.

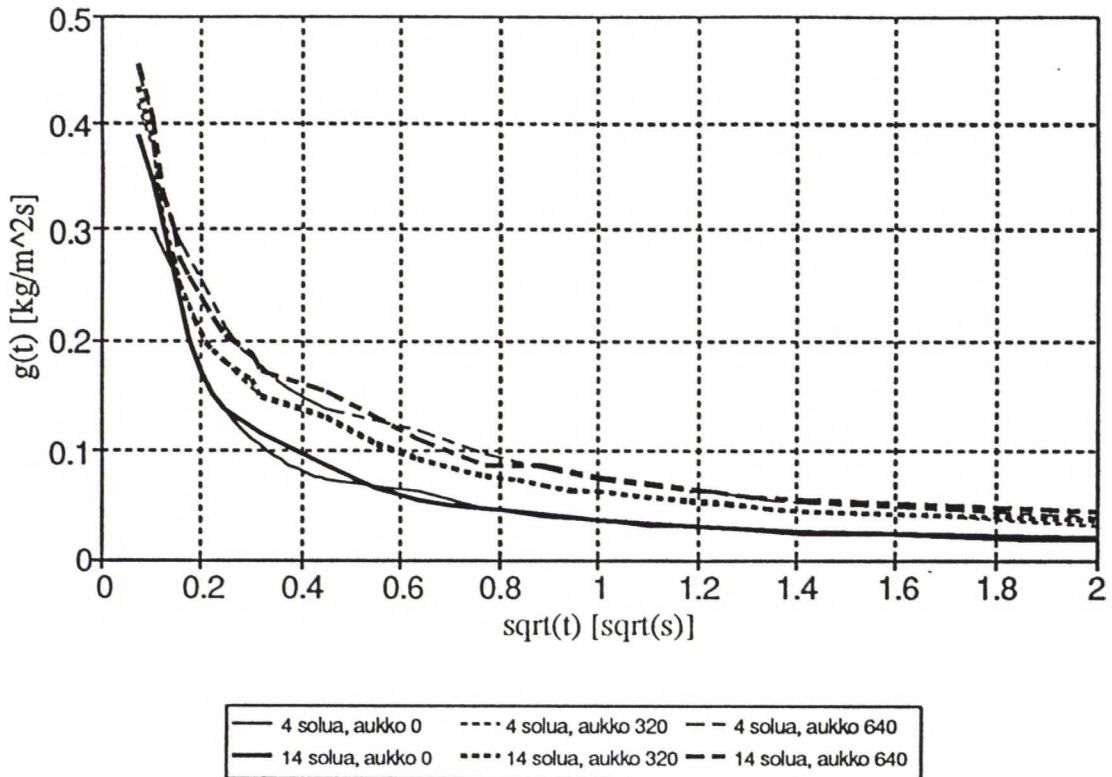
Kokonaiskosteusvirran elementtikohtaiset prosentuaaliset osuudet jakautuivat erittäin tasaisesti kaikkien elementtien kesken. Kokonaiskosteusvirrasta muodostetun kosteusvirran tiheyden suhde suhteelliseen painonmuutokseen on esitetty kuvassa 25. Kuvassa on kaikkien epästationaarisella analyysillä laskettujen neliömallien kosteusvirran tiheyksien kuvaajat.



Kuva 25. Neliömallien kaikkien epästationaaristen tapauksien kosteusvirran tiheydet. Efektiivisellä huokosaukolla on selvästi kosteusvirran tiheyttä kasvattava vaikutus.

Saman efektiivisen huokosaukon omaavilla malleilla on samalla tarkasteluajanhetkellä samat kosteusvirran tiheydet. Kun kosteusvirrantiheys esitetään suhteellisen painonmuutoksen avulla, voidaan verrata kuvaajien identtisyyttä. Kosteusvirran tiheyden tasaantuminen tapahtuu jo kosteuspitoisuuksien erojen tasoittumisen alkuvaiheessa. Tasoittumista voidaan pitkittää efektiivisen huokosaukon leventämisen avulla.

Kennomallilla laskettiin eri aspiraatioasteessa olevien tapauksien kosteusvirran tiheyksiä epästationaarisella analyysillä. Kuvassa 26 on esitetty aspiraatioasteet 0 %, 50 % ja 100 % puolipaksuuksilla 42  $\mu\text{m}$ :ä ja 147  $\mu\text{m}$ :ä. Kosteusvirran tiheydet on esitetty ajan funktiona.



Kuva 26. Kennomallin kosteusvirran tiheydet ajan neliöjuuren funktiona. Kosteusvirran tiheydet eri puolipaksuuksilla ja samalla aspiraatioasteella ovat lähes identtiset.

## 6.2 Kosteuspitoisuus ja kosteuskertymä

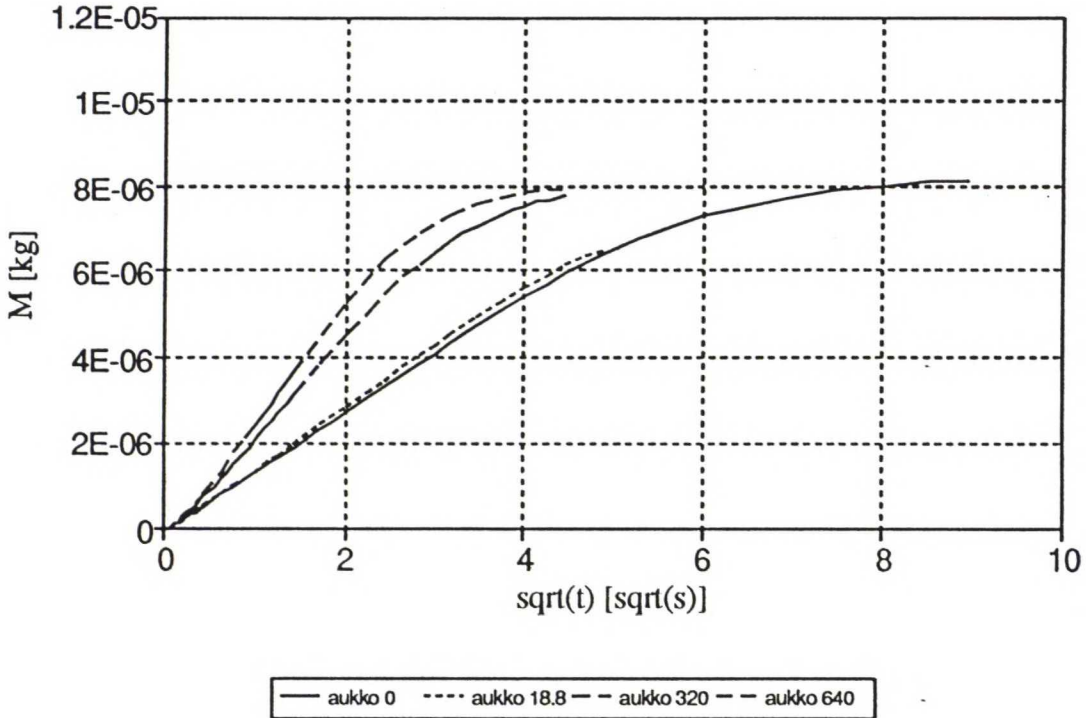
NISA-ohjelmassa laskenta-aika kasvaa huomattavasti lähestyttäessä tasaantumiskosteuspitoisuutta. Laskenta on lopetettu usein maksimidiffusiviteetin saavuttamisen jälkeen. Mallin saavutettavissa oleva tasaantumiskosteuspitoisuuden kosteuskertymä on laskettu kaavalla 28. Laskentamallien eri puolipaksuuksilla saavutettavat tasaantumiskosteuspitoisuuden kosteuskertymät on esitetty taulukossa 18. Kosteuskertymän suuruus on suoraan verrannollinen kiintoainemäärään, kosteuskapasiteettiin sekä tilavuuteen.

Taulukko 18. Tasaantumiskosteuspitoisuuden kumulatiiviset kosteuskertymät eri laskentamalleilla kappaleen tilavuutta kohti.

	Neliö		Kenno		Epäs.
$l$ [ $\mu\text{m}$ ]	75	150	42	147	180
$M_f$ [kg]	7.5e-6	15e-6	8.18e-6	28.6e-6	83.3e-6



Kuvassa 27 on esitettyä kennomallin puolipaksuuden  $42\ \mu\text{m}$ :ä kaikkien laskentatapauksien kosteuskertymät ajan neliöjuuren funktiona.

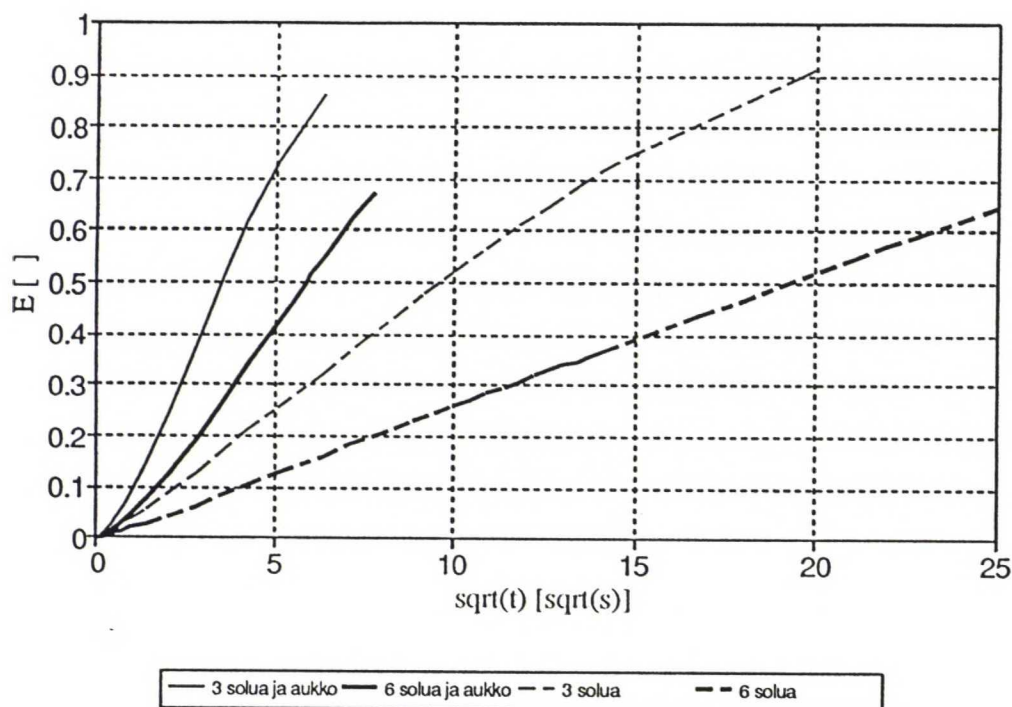


Kuva 27. Neljän solun kennomallien kumulatiiviset kosteuskertymäkuvaajat. Efektiivisellä huokosaukolla voidaan nopeuttaa tasaantumiskosteuden saavuttamista. Kuvaajan muodossa tapahtuu muutos kosteuspitoisuuden erojen tasoittumisen alussa.

### 6.3 Suhteellinen painonmuutos

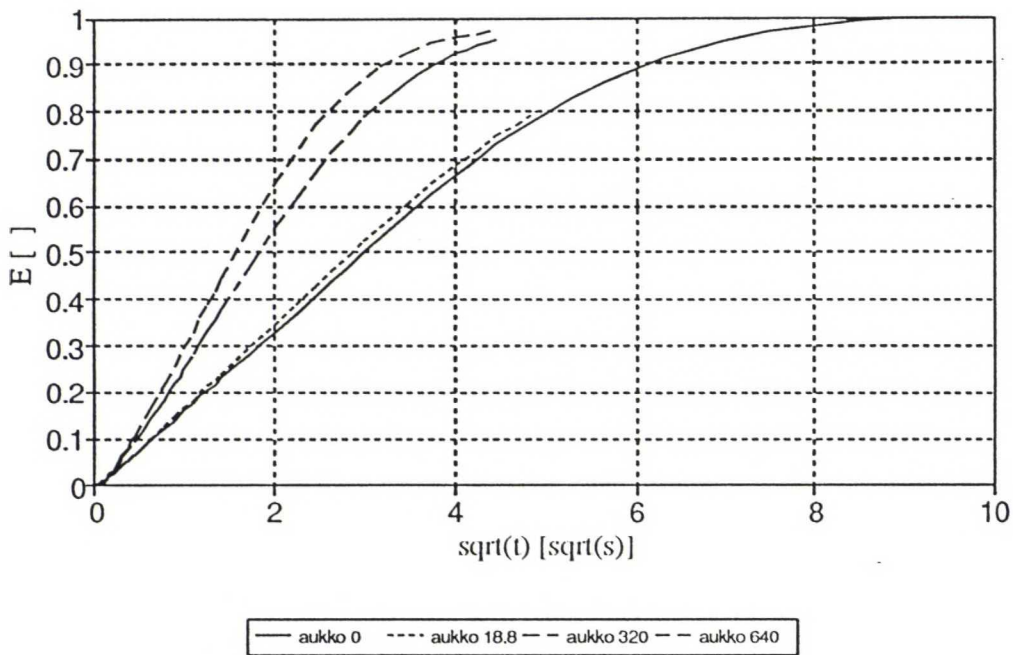
Kumulatiivisen kosteuskertymän avulla muodostettiin kaavaa 24 käyttäen suhteellisen painonmuutoksen kuvaajat. Kaikki suhteellisten painonmuutoksien kuvaajat on esitetty ajan neliöjuuren funktiona. Kuvaajista voidaan laskea Crankin (1975) esittämällä kaavalla 15 diffuusiokertoimet.

Kuvassa 28 neliömallin suhteellisen painonmuutoksen kuvaajan lineaarinen osuus sorption alusta kasvaa puolipaksuuden kasvaessa ja huokosaukkojen puuttuessa mallista. Kaikilla tapauksilla lineaarinen osuus loppuu suhteellisen painonmuutoksen arvon ollessa noin 0,6.



Kuva 28. Neliömallien suhteellisten painonmuutoksien kuvaajat. Kuuden solun laskentatapaukset on lopetettu jo pian suhteellisen painonmuutoksen saavutettua arvon 0,6. Puolipaksuudella on selvä vaikutus kulmakertoimeen.

Päätutkimuskohteena olleen kennomallien suhteellisen painonmuutoksen kuvaajat on esitetty kuvissa 29 ja 30. Kuvassa 29 on nelisoluisen kennomallin kuvaajat ja kuvassa 30 14-soluisen kennomallin kuvaajat. Kaikki kennomallien suhteellisen painonmuutoksen kuvaajat ajan neliöjuuren funktiona on esitetty erikseen liitteessä J. Neljän solun kennomallin suhteellisen painonmuutoksen kuvaajissa näkyy lopussa tapahtuva kosteuspitoisuuden kasvun hidastuminen. Muuten kuvaajat käyttäytyvät samoin kuin neliömallissakin. Sorption alussa olevan lineaarisen osuuden loppuminen aikaisemmin suuremmalla huokosaukolla näkyy parhaiten neljän solun kennomallilla. Kulmakertoimen hetkellisen kasvun jälkeen saavutetaan taas lineaarinen osuus. Kaikissa tapauksissa lineaarinen osuus päättyy suhteellisen painonmuutoksen arvon ollessa noin 0,65. Tämän jälkeen alkaa hidas kosteuspitoisuuden kasvaminen kohti tasapainokosteutta.

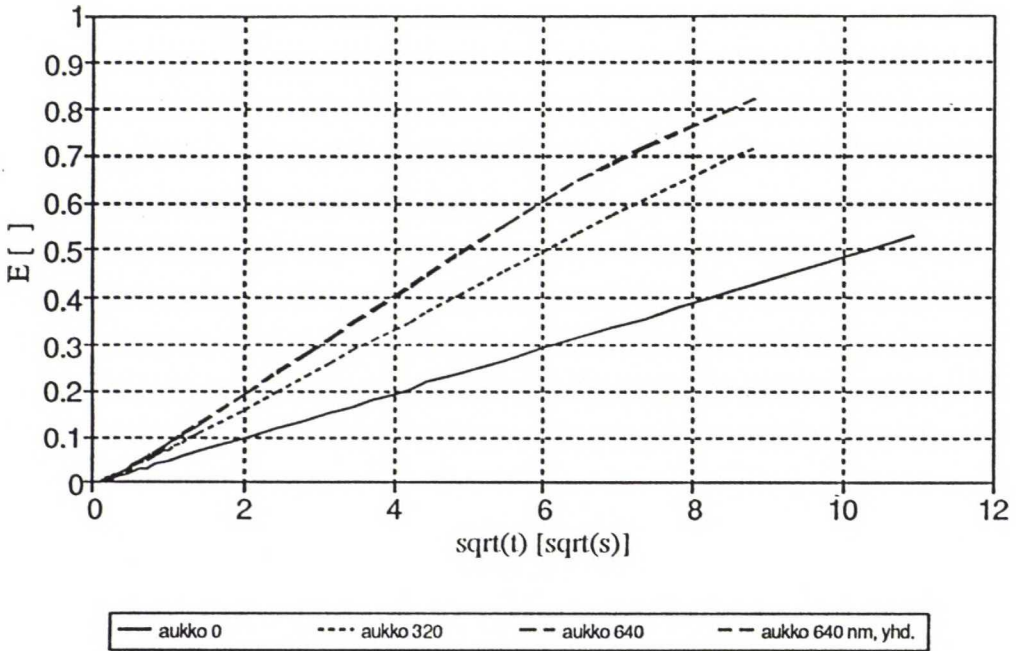


Kuva 29. Neljän solun kennomallin kaikkien laskentatapausten suhteelliset painonmuutokset ajan neliöjuuren funktiona. Efektiivisen huokosaukon kasvaessa kuvaajien kulmakerroin kasvaa voimakkaasti.

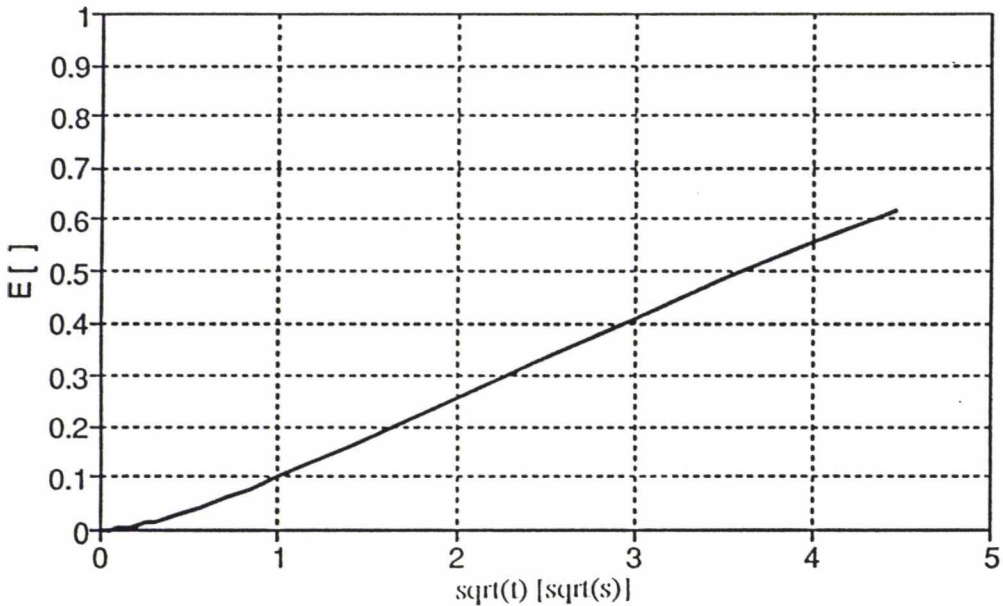
Kuvassa 30 14:sta solun kennomallin suhteellisten painonmuutosten kuvaajien kulmakerroin ei kasva sorption alussa niin voimakkaasti kuin nelisoluisten kennomallien kulmakertoimet. Lineaarisen osuuden päättyminen näkyy hyvin vain kuvaajassa, jossa efektiivisen huokosaukon leveys on 640 nm. Efektiivisen huokosaukon ollessa 320 nm lineaarinen osuus saattaa loppua hieman pienemmällä suhteellisen painonmuutoksen arvolla.

Kuvassa 31 on epäsymmetrisen mallin suhteellisen painonmuutoksen kuvaaja. Kuvaajassa näkyy sorption alussa kosteuden sitoutumisviive pienen kulmakertoimen osuutena. Sitoutumisviiveen jälkeen kuvaaja jatkuu lineaarisena suhteellisen painonmuutoksen arvoon 0,5 saakka. Tämän jälkeen kulmakerroin pienenee. Lineaarisen osuuden loppuminen aikaisemmin kuin muissa malleissa voi johtua myös tarkastelupisteiden harvuudesta suhteellisen painonmuutoksen arvon 0,5 jälkeen.





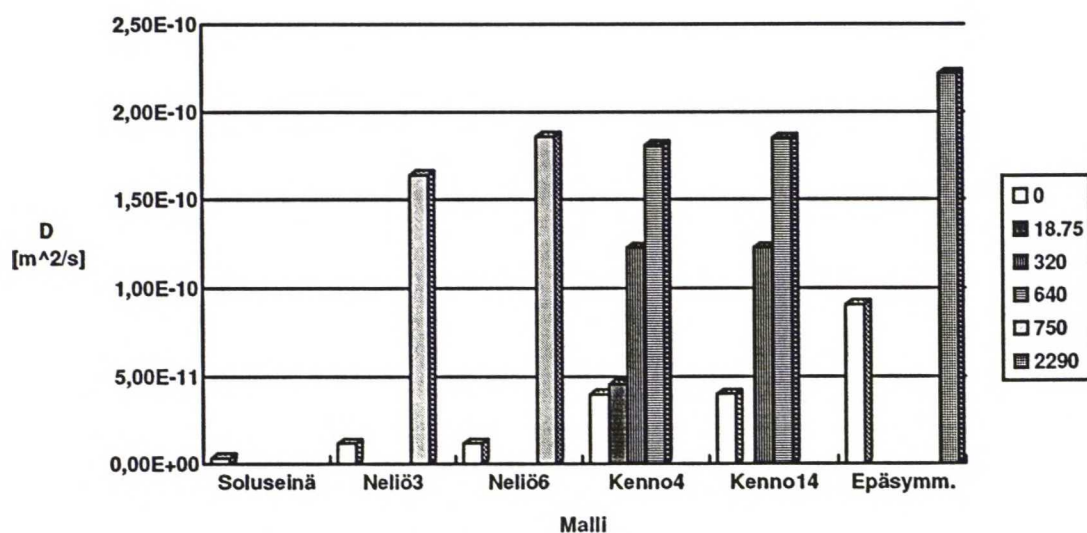
Kuva 30. Neljäntoista solun kennomallin kaikkien laskentatapauksien suhteelliset painonmuutokset ajan neliöjuuren funktiona. Laskentatapaukset, joissa efektiivinen huokosaukon leveys on 640 nm ja joiden efektiivisen huokosaukon solmut oli ensimmäisessä tapauksessa yhdistetty soluseinän solmuihin ja toisessa tapauksessa ei oltu yhdistetty, ovat lähes identtiset. Efektiivisen huokosaukon suuruuden vaikutus kulmakertoimeen ei ole yhtä voimakas kuin pienemmällä puolipaksuudella.



Kuva 31. Epäsymmetrisen mallin suhteellinen painonmuutos ajan neliöjuuren funktiona. Laskennan alussa on erittäin voimakas Fickin lain vastainen loiva osuus kuvaajassa.

## 6.4 Diffuusiokertoimet

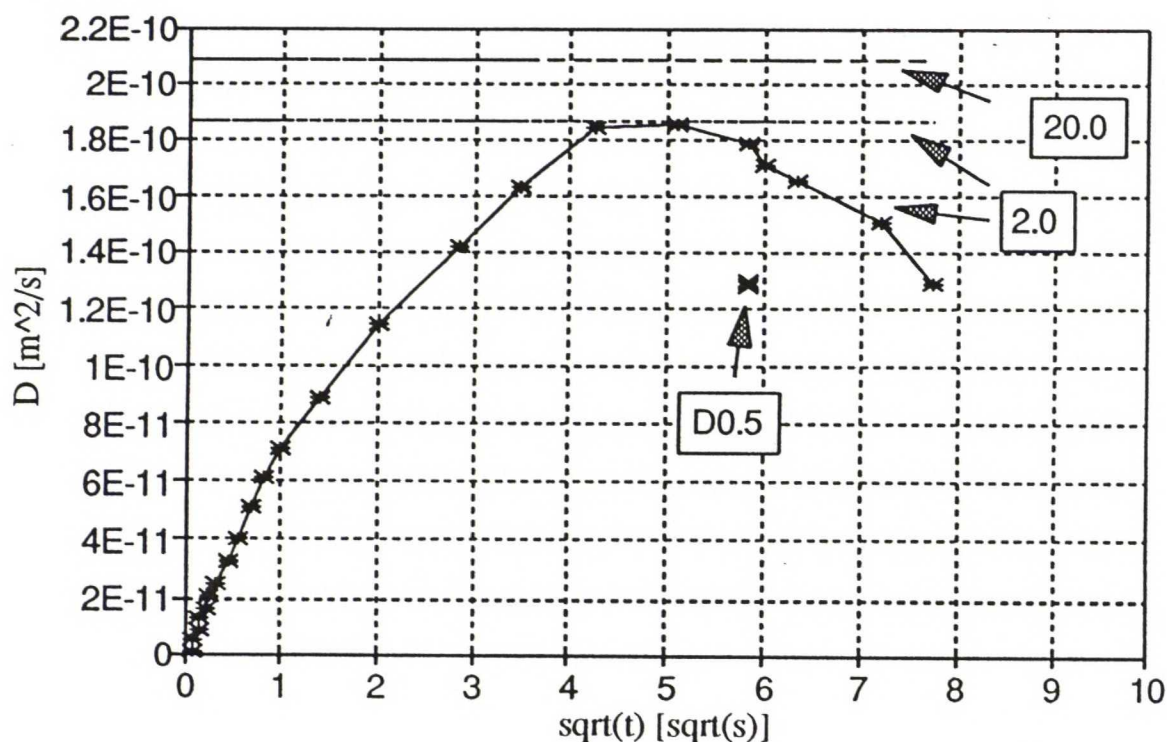
Stationaarisissa olosuhteissa diffuusiokertoimet on laskettu kaikille laskentatapauksille. Diffuusiokertoimia laskettiin myös eri pinnansiirtokerrointen arvolla. Laskentakaavana käytettiin kaavaa 16. Pienin käytetty pinnansiirtokerroimen arvo oli 2,01 m/s. Pinnansiirtokerroin vastasi 13  $\mu\text{m}$ :n seisovaa ilmakerrosta mallin pinnalla. Kuvassa 32 on esitetty kaikkien pinnansiirtokerroimella 2,01 m/s laskettujen stationaaristen laskentatapausten diffuusiokertoimet.



Kuva 32. Stationaaristen olosuhteiden diffuusiokertoimet kun pinnansiirtokerroimenä käytettiin arvoa 2,01 m/s. Numero mallin perässä ilmoittaa mallin puolipaksuudessa olleiden solujen lukumäärän. Selitteessä oleva luku ilmoittaa efektiivisen huokosaukon leveyden nanometreinä. Kuvassa diffuusiokerrointen potentiaalina on puun kosteuspitoisuus.

Stationaaristen olosuhteiden tapauksilla tarkasteltiin pinnansiirtokerroimen vaikutusta diffuusiokertoimeen. Kaikkiaan käytettiin kolmea eri pinnansiirtokerrointa. Suuremman pinnansiirtokerroimen tapauksessa pinnalla vallitsi 1,3  $\mu\text{m}$ :n seisova ilmakerros. Suurin käytetty pinnansiirtokerroin oli 2010 m/s. Tällöin pinnalla vallitsi 13 nm:n paksuinen seisova ilmakerros. Ilmakerroksen paksuudella oli huokosaukollisten neliömallien tapauksissa selvä vaikutus

diffuusiokerrointen suuruuteen. Vaikutus näkyy kuvassa 33. Muilla laskentamalleilla ei havaittu vastaavaa vaikutusta. Eri pinnansiirtokerroimilla laskettuja stationaarisen analyysin diffuusiokerroimia on esitetty liitteessä K. Pinnansiirtokerroimella oli merkittävää vaikutusta vain neliömallin tapauksessa.



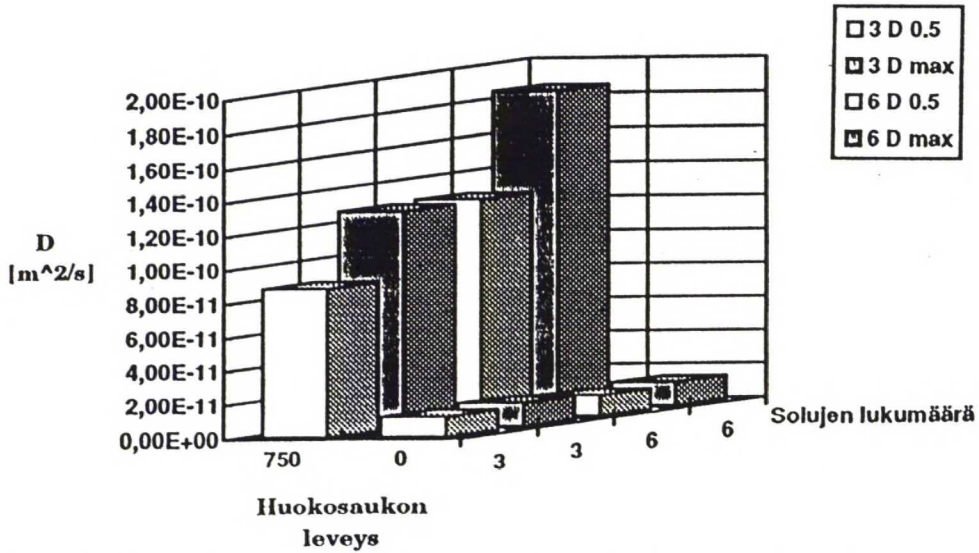
Kuva 33. Kuusisoluisen huokosaukollisen neliömallin diffuusiokerroimet. Kuvan ylälaidassa stationaaritapausten diffuusiokerroimet.

- Epästationaaritapausten diffuusiokerroin on esitetty pisteenä hetkellisen diffuusiokerroimen kuvaajan alapuolella. Kuvassa oikealla käytetyt pinnansiirtokerrointen suuruudet [m/s].

Epästationaarisilla olosuhteilla ei tehty vastaavaa pinnansiirtokerrointarkastelua, vaan tapaukset laskettiin käyttäen pinnansiirtokerrointa 2,01 m/s. Neliömallin epästationaaristen olosuhteiden diffuusiokerroimet on esitetty kuvassa 34. Kuvassa 34 diffuusiokerroimille on jokaisessa tapauksessa esitetty kaksi eri arvoa. Diffuusiokerroimen arvo  $D_{0.5}$  esittää diffuusiokerroimen arvoa, joka on saatu kun suhteellisen painonmuutoksen arvo on 0.5. Diffuusiokerroimen arvo  $D_{max}$  esittää arvoa, joka on hetkellisen diffuusiokerroimen



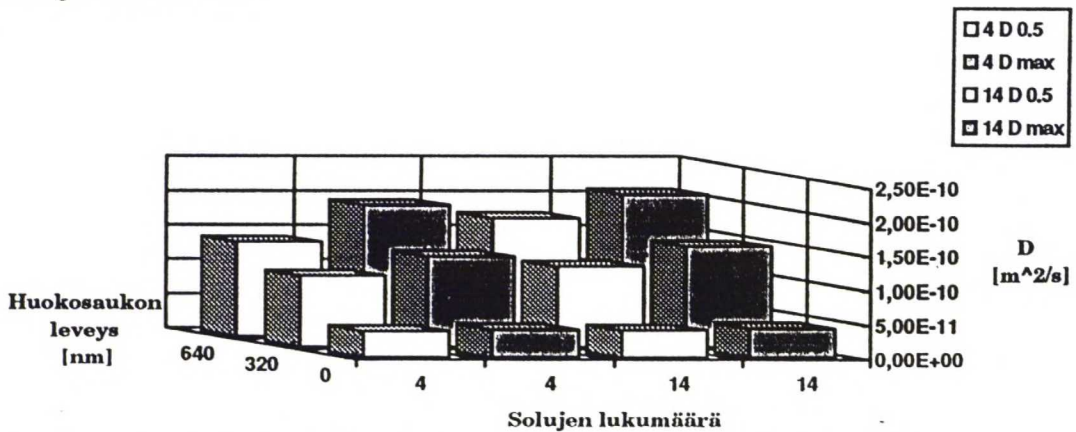
maksimiarvo. Huokosaukon leveydellä 0 nm tarkoitetaan huokosaukotonta mallia.



Kuva 34. Neliömallien kaikkien epästationaaristen laskentatapausten diffuusiokerroimet laskettuna suhteellisen painonmuutoksen välistä 0 - 0.5 sekä hetkellisen diffuusiokerroimen maksimiarvot.

Kuvassa 34 suljettujen huokosaukkojen tapauksessa paksuusvaikutus on vähäinen. Huokosaukollisilla soluilla diffuusiokerroin kasvaa selvästi puolipaksuuden kasvaessa.

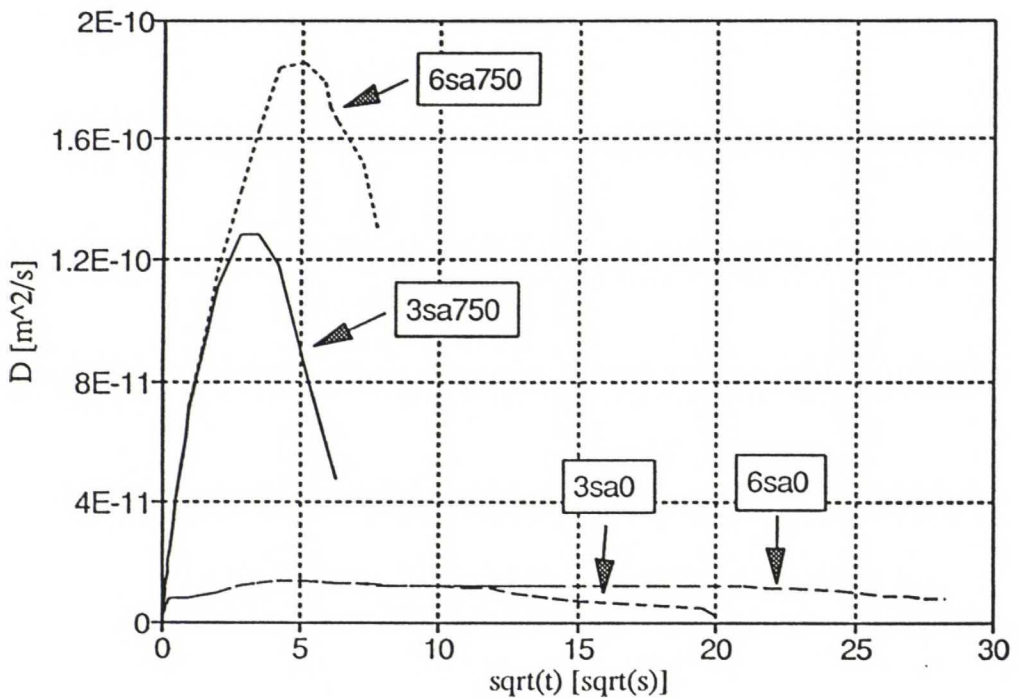
Kuvassa 35 on kennomallin neljän ja 14-solun diffuusiokerrointen  $D$  0.5 ja  $D$  max arvot. Arvot on esitetty huokosaukkojen leveyksillä 0 nm:ä, 320 nm:ä ja 640 nm:ä.



Kuva 35. Kennomallin diffuusiokerroimia eri huokosaukon leveyksillä ja puolipaksuuksilla.

Kuvassa 35 havaitaan aspiraatioasteen kasvamisella olevan selvästi diffuusiokerrointa pienentävä vaikutus. Puolipaksuuden vaikutus tehostuu suurilla huokosaukon leveyksillä.

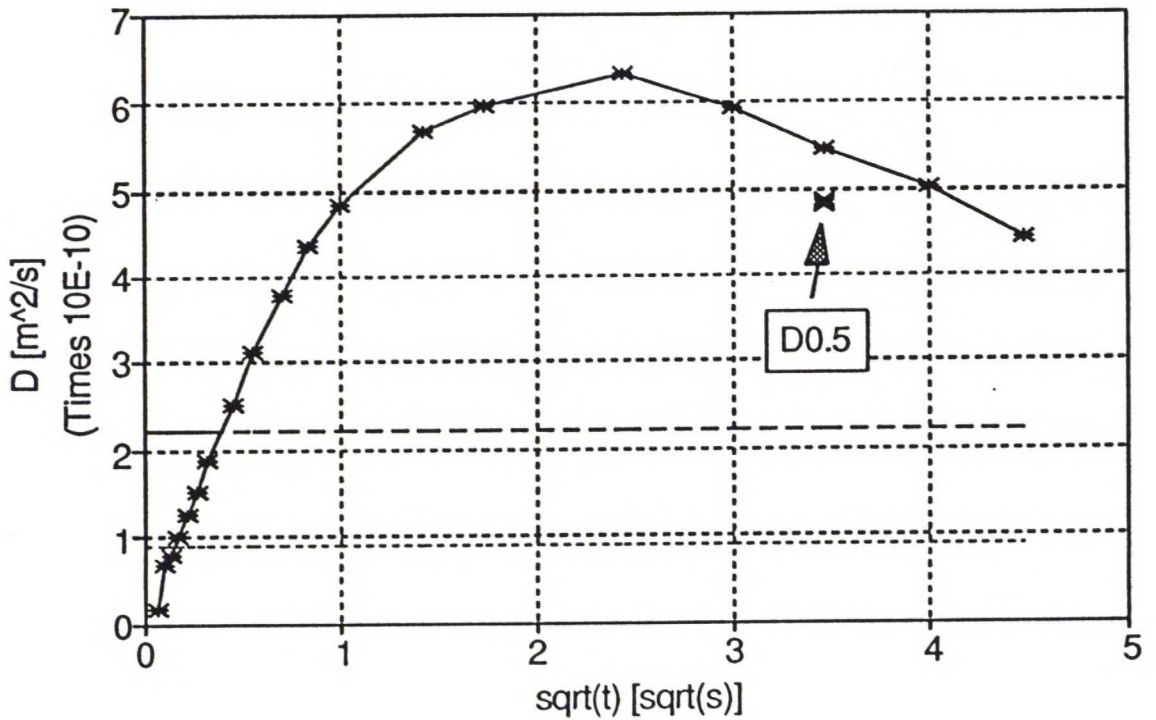
Kuvassa 36 on esitetty kaikki neliömallien hetkelliset diffuusiokertoimet. Hetkellisen diffuusiokertoimen kuvaajat säilyttävät perusmuotonsa ja maksimiarvo saavutetaan myöhemmin puolipaksuuden kasvaessa. Huokosaukottoman mallin kuvaajat eivät saavuta erillistä huppua.



Kuva 36. Kaikki neliömallin hetkelliset diffuusiokertoimet ajan neliöjuuren funktiona.

Epäsymmetrisen mallin hetkellisen diffuusiokertoimen kuvaaja ajan neliöjuuren funktiona on esitetty kuvassa 37. Kuvaajaan on yhdistetty suhteellisen painonmuutoksen väliltä 0 - 0.5 laskettu diffuusikerroin  $D$  0.5. Muiden laskentamallien vastaavat kuvaajat on esitetty liitteessä L.

Kuvassa 37 hetkellisen diffuusikertoimen kuvaaja ei värähtelee. Maksimi diffusiviteetti on ollut jo kuusi sekuntia ennen suhteellisen painonmuutoksen arvoa 0,5.



Kuva 37. Epäsymmetrisen mallin hetkellisen diffuusiokertoimen kuvaaja ja suhteellisen painonmuutoksen väliltä 0 - 0.5 laskettu diffuusiokerroin.

Kaikki eri mallien stationaaristen ja epästationaaristen laskentatapausten diffuusiokerrointen numeroarvot on esitetty taulukossa 19. Kaikissa tapauksissa laskentatulosten diffuusiokertoimien potentiaalina on käytetty puun kosteuspitoisuutta.

Taulukon 19 diffuusiokerrointen laskennassa kaikissa malleissa on käytetty pinnansiirtokerroimen arvona 2,01 m/s. Taulukon diffuusiokertoimia on analysoitu tarkemmin luvun 8 eri kappaleissa.

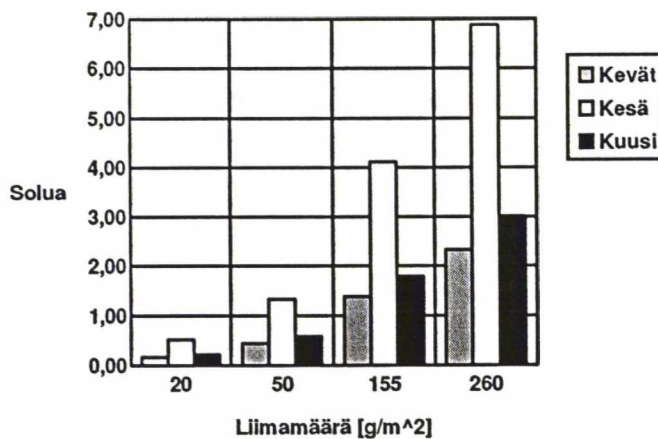


Taulukko 19. Kaikkien laskentatapausten diffuusiokertoimet kun pinnansiirtokertoimena käytettiin arvoa 2,01 m/s.

Laskentamalli	Diff. kerroin E-10 [m <sup>2</sup> /s]	Efektiivisen huokosaukon leveys [nm]					
		0	18.75	320	640	750	2290
Neliö 3 solua	<i>D</i> 0.5	0.12	-	-	-	0.89	-
	<i>D</i> max	0.14	-	-	-	1.28	-
	<i>D</i> ss	0.12	-	-	-	1.64	-
Neliö 6 solua	<i>D</i> 0.5	0.12	-	-	-	1.29	-
	<i>D</i> max	0.14	-	-	-	1.86	-
	<i>D</i> ss	0.12	-	-	-	1.86	-
Kenno 4 solua	<i>D</i> 0.5	0.39	0.42	1.03	1.38	-	-
	<i>D</i> max	0.41	0.47	1.32	1.91	-	-
	<i>D</i> ss	0.40	0.47	1.23	1.81	-	-
Kenno 14 solua	<i>D</i> 0.5	0.40	-	1.17	1.72	-	-
	<i>D</i> max	0.43	-	1.47	2.07	-	-
	<i>D</i> ss	0.40	-	1.23	1.85	-	-
Kenno 14 solua solm. yhd.	<i>D</i> 0.5	-	-	-	1.74	-	-
	<i>D</i> max	-	-	-	2.02	-	-
Epäsymm.	<i>D</i> 0.5	-	-	-	-	-	4.84
	<i>D</i> max	-	-	-	-	-	6.34
	<i>D</i> ss	0.91	-	-	-	-	2.22

## 7 LIIMATÄYTTÄISEN PUUSOLUKON MALLINTAMINEN JA LASKENTATULOKSET

Liimatäytteisellä puusolukolla mallinnettiin puuviilutuotteiden valmistuksessa vaihtelevaa liiman tunkeutumista viilujen puusolukkoon. Tavallisesti havuvanerituotteita liimattaessa käytettävät liimamäärät ovat hiukan koivuvanerin liimamääriä suurempia. Käytetyt liimamäärät vaihtelevat liimattavien viilupaksuuksien mukaan. Tyypillisimmät teollisuudessa käytetyt liimamäärät ohuiden (1,0 - 1,5 mm) koivuviilujen liimauksessa ovat 140 - 150 g/m<sup>2</sup>. Ohuilla havupuuviiluilla (1,5 mm) liimamäärä on hieman suurempi, noin 150 - 160 g/m<sup>2</sup>. Paksummilla havupuuviiluilla liimamäärä kasvaa 170 - 180 g/m<sup>2</sup>. Havupuuviilujen vaatima suurempi liimamäärä johtuu havupuuviilujen karkeammasta pinnanlaadusta. Kertopuutuotteilla viilun nimellispaksuus on 3,32 mm ja liimamäärä vaihtelee palkin leveyden (27 - 75 mm) mukaan 230 - 260 g/m<sup>2</sup>. Ristiin viilutetussa tuotteessa liimamäärät ovat 10 g/m<sup>2</sup> suuremmat kuin suuntaisesti viilutetussa tuotteessa.



Kuva 38. Liiman teoreettinen riittoisuus kuusen solukossa. Osoitetuilla liimamäärillä täyttyy liimalla molemmin puolin liimasaumaa kuvan osoittama lukumäärä soluja.

Oletetaan että viilun pinnan solurakenne on ehjää ja koostuu pelkistä taulukoissa 1 ja 2 esitetyistä keskikokoisista kesä- ja kevätpuutrakeideista. Lisäksi oletetaan että liima jakaantuu tasan kummallekin viilulle eikä saumaan jää liimaa. Edellisillä oletuksilla

liimamäärä  $155 \text{ g/m}^2$  täyttää 1,4 kevätpuutrakeidia ja 4,1 kesäpuutrakeidia. Kesäpuuosuuden ollessa 15 % täyttyy keskimäärin noin 1,8 trakeidia molemmin puolin liimasaumaa. Kuvassa 38 on esitetty edellisten olettamusten perusteella liiman soluihin tunkeutuman jakautumia eri liimamäärillä.

Liiman todellinen riittoisuus soluihin poikkeaa kuvassa 38 esitetystä. Poikkeaman syitä ovat viilujen väliin jäävä puuainekseton liimakerros, liiman pursuaminen viilujen välistä, imeytyminen ydinsäteisiin ja imeytyminen sorvaushalkeamiin. Lisäksi kuvassa 38 oletettiin että solut ovat ehjiä ja kokoonpuristumattomia. Havupuuvanereilla kokoonpuristuminen voi olla yli 10 % kokonaispaksuudesta (Koponen H. 1990). Suurimmat kokoonpuristumat havaittiin "Puutuotteiden rajakerrosten ominaisuuksien mallittaminen" -projektiin laboratoriossa valmistetuissa ohutviiluisissa (0,15 - 0,55 mm) kuusivanereissa. Viilujen kokoonpuristuma oli jopa noin 10 % - 35 %. Suurella kokoonpuristumalla tulee suurempi liimattava pinta-ala ja siten solujen täyttyminen on myös suurempi kuin kuva 38 osoittaa.

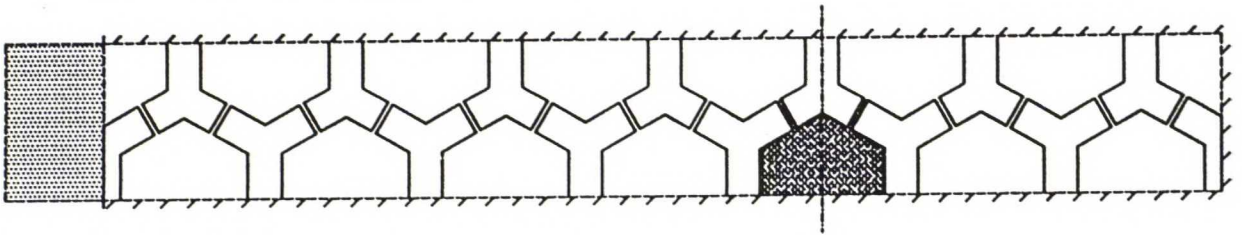
Ohuiden erikoistuotteiden liimausmenetelmänä käytetään filmiliimausta. Vanerituotteiden liimauksessa yleisimmin käytetyt liimat ovat fenolihartseja, ureahartseja ja urea-melamiinihartseja. Tyypillisimmin käytetyt fenolipohjaiset liimat koostuvat hartsista, kovetteesta ja vedestä. Osuuksien paino-osat jakautuvat aineiden kesken edellä mainitussa järjestyksessä 100, 14 - 17 ja 12 - 18. Seoksen kuiva-ainespitoisuus on noin 48 %. Kovettuneen liiman tiheydeksi tulee noin  $1200 - 1300 \text{ kg/m}^3$ .

## 7.1 Laskentamallien rakenne

Liimatäytteen puusolukon laskentamallit perustuvat 14-soluiseen kennomalliin. Kennomallin huokosaukon efektiiviseksi leveydeksi valittiin 640 nm:ä. Mallien oletettiin koostuvan kolmesta viilusta ja kahdesta liimasaumasta. Malleissa liimasauma asetettiin siten että mallien pintaan jäi 94,5  $\mu\text{m}$ :ä paksu kerros soluja. Keskellä olevan viilun paksuudeksi jäi 105  $\mu\text{m}$ :ä. Mallien puolipaksuus oli 147  $\mu\text{m}$ :ä.

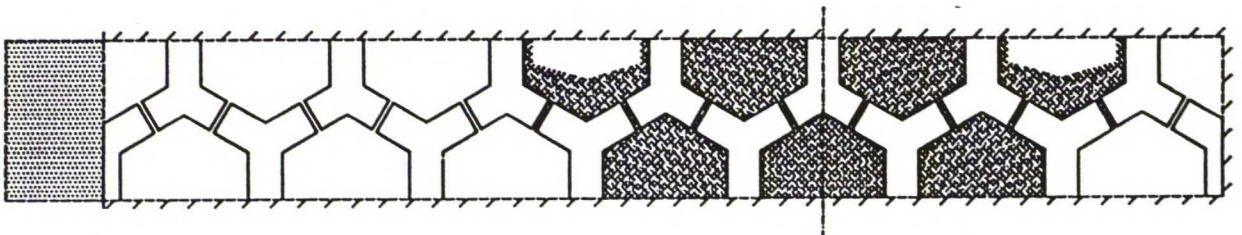


Liimatäytteistä solukkoa testattiin kahdella eri mallilla. Ensimmäisessä mallissa täytettiin liimalla yksi solu ja sen efektiiviset huokosaukot. Malli on kuvassa 39. Solukko koostuu pienistä kesäpuusoluista. Liiman täyttämä pinta-ala on  $148 \mu\text{m}^2$ . Yhdelle viilun puolelle levitettynä liimamääränä se vastaa noin  $9.5 \text{ g/m}^2$ . Tällöin kaikki levitykseen käytetty liima imeytyisi solukkaan ilman erillisiä hävikkejä. Mallilla vertaillaan kosteuspitoisuuden arvoja ajan funktiona liimasauman kohdalla. Vertailtavia solmuja on valittu liimalla täytetyn solun sisältä ja soluseinästä. Liimalla täytetyillä soluilla voidaan tutkia mitä reittejä kosteus pyrkii kulkeutumaan liiman muodostaman rajakerroksen läpi.



Kuva 39. Liimalla täytetyn solukon ensimmäinen malli. Mallissa oleva liimamäärä vastaa viilun liimauksessa enintään liimamäärää  $9.5 \text{ g/m}^2$ . Täyttynyt solu on pieni kesäpuusolu.

Toisessa mallissa liimalla täytettiin viisi solua kokonaan ja kaksi muuta solua osittain. Liiman oletettiin tunkeutuneen osittainkin liimalla täyttyneissä soluissa efektiivisiin huokosaukkoihin. Liiman täyttämän pinta-alan suuruus on  $879 \mu\text{m}^2$ . Pinta-ala vastaa optimissaan viilun liimauksessa käytettävää liimamäärää noin  $55 \text{ g/m}^2$ . Kuvassa 40 on esitetty liimatäytteisen solukon toinen malli. Katkoviivoitettu kohta on liimasauman kohta. Liimauksessa ei kuitenkaan tällöin olisi erillistä solurakenteetonta liimakerrosta.



Kuva 40. Liimalla täytetyn solukon toinen malli. Mallissa oleva liimamäärä vastaa viilun liimauksessa enintään liimamäärää  $55 \text{ g/m}^2$ . Kvalitatiivisesti mallissa on täyttynyt teollista viilun liimausta vastaava määrä soluja.

Kuvan 40 mallissa liima täyttää solukosta yhtä paljon soluja kuin normaalia kuusivaneria liimattaessakin. Mallin solut ovat keskimääräistä pienempiä ja siten liimamääräkin on suhteessa pienempi kuin teollisessa tuotannossa.

## 7.2 Liiman materiaaliominaisuudet

Laskentaan tarvittavia liiman materiaaliominaisuuksia ei tunnettu tutkimusta aloitettaessa. Tarvittavat materiaaliominaisuudet selvitettiin kovettamalla fenoli-formaldehydihartsia. Kovettuneen liiman kosteudensiirto-ominaisuuksia tutkittiin sorptiokokeella. Sorptiokokeessa ilman kosteuspitoisuus kasvatettiin suhteellisen kosteuden arvosta 50 % suhteellisen kosteuden arvoon 75 %. Liiman kosteuspitoisuus kuivapainosta muuttui 25,5 %:sta 41,6 %:n. Kosteuspitoisuuden muutoksesta tehtiin suhteellisen painonmuutoksen kuvaaja (Simpanen 1994).

Kosteudesta uunikuivatetun kovettuneen liiman tiheydeksi mitattiin  $1244 \text{ kg/m}^3$ .

Liiman kosteuskapasiteetti laskettiin soveltamalla soluseinän kosteuskapasiteetin laskentaan käytettyä kaavaa 8. Kosteuskapasiteetin arvoksi saatiin 74205. Tiheytenä käytettiin uunikuivatun liiman tiheyttä. Tiheydessä ei huomioitu liiman huokoisuutta. FEM-laskentaa varten kosteuskapasiteetti muutetaan kaavan 9 avulla. Tällöin kosteuskapasiteetista saadaan lämpöanalogiaan sopiva lämpökapasiteetti.

Diffuusiokertoimia laskettiin eri kohdilta sorptiokokeen suhteellisen painonmuutoksen kuvaajaa. Laskennassa käytettiin kaavaa 15. Diffuusiokerrointen maksimi-arvoksi saatiin  $5.6 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ , potentiaalina on liiman kosteuspitoisuus. Mallinnuksessa käytettiin diffuusiokertoimen arvoa joka oli laskettu suhteellisen painonmuutoksen (E) arvon vaihteluväliltä 0.1 - 0.5. Tällöin jää huomioimatta alussa vaikuttanut pintavastuksen diffuusiota hidastava vaikutus. Arvoksi saatiin  $2.9 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  kun potentiaalina on liiman kosteuspitoisuus (Simpanen 1994).



Ilman kosteuspitoisuuden ollessa potentiaalina diffuusiokertoimen arvoksi saadaan kaavaa 14 soveltamalla  $2.2\text{e-}6 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Taulukkoon 20 on koottu FEM-laskennassa käytetyt liiman materiaaliominaisuuksien arvot laskentaan syötetyssä muodossa.

*Taulukko 20. FEM-laskennan kosteuden siirtymistä tarkasteltaessa tarvittavat liiman materiaaliominaisuuksien arvot. Diffuusiokertoimessa potentiaalina on ilman kosteuspitoisuus.*

Parametri			NISA	
	Arvo	[ ]	Arvo	[ ]
$\rho$	1244	$\text{kg/m}^3$	$1.25\text{e-}6$	$\text{kg/mm}^3$
D	$2.2\text{e-}6$	$\text{m}^2/\text{s}$	2.17	$\text{mm}^2/\text{s}$
$\xi$	74205		$5.96\text{e+}10$	

Soluseinälle ja ilmalle käytettiin samoja materiaaliominaisuuksia kuin kennomallin laskenassakin. Materiaaliominaisuudet ja reunaehtojen arvot on esitetty taulukossa 15.

### 7.3 Kosteusvirta ja kosteusvirran tiheys

Stationaarisen tarkastelun elementtikohtaiset kosteusvirran arvot on koottuna liitteessä K. Kosteusvirran tiheyden arvot ovat taulukossa 21. Koko malliin kohdistuvan kosteusvirran tiheyden arvoja tarkasteltiin stationaaritapauksessa kahdella eri pinnansiirtokertoimen arvolla. Eri pinnansiirtokertoimien vaikutus oli hyvin pieni.

*Taulukko 21. Liimatäytteen solukon stationaaristen tapauksien malliin kohdistuvien kosteusvirran tiheyksien vertailut eri pinnansiirtokerrointen välillä.*

Malli	$\beta$	$g$
	[m/s]	[ $\text{kg/m}^2\text{s}$ ]
Liima 1	2.01	0.00746
	2010	0.00751
Liima 2	2.01	0.00350
	2010	0.00351



Epästationaaristen tapausten kosteusvirran tiheydet olivat lähes saman suuruisia. Havaittavaa eroa tapahtuu vasta ensimmäisen liimatäytteisen mallin saavutettua suhteellisen painonmuutoksen arvon noin 0.6. Samoin käy verratessa liimatäytteisiä malleja liimattomaan perusmalliin. Aluksi kosteusvirrasta noin kolmasosa meni soluseinän läpi. Myöhemmässä vaiheessa, soluseinän saavutettua suuremman kosteuspitoisuuden pääasiallisena reittinä oli *soluontelo - huokosaukko*.

#### 7.4 Kosteuspitoisuus ja kosteuskertymä

Mallien tasapainokosteuden kosteuskertymä laskettiin kaavaan 28 lisäämällä liiman osuus kosteuskertymästä. Tasapainokosteuden kosteuskertymän kaavaksi saatiin:

$$M_f = M_i + \left( P + \frac{V_s}{V} \xi_s + \frac{V_g}{V} \xi_g \right) V \quad (35)$$

$M_f$  = kosteuspitoisuus lopussa [kg]

$M_i$  = kosteuspitoisuus alussa [kg]

$P$  = huokoisuus [-]

$V_s$  = puun kiintoaineksen tilavuus [ $m^3$ ]

$V$  = tilavuus [ $m^3$ ]

$\xi_s$  = puun kiintoaineksen kosteuskapasiteetti [-]

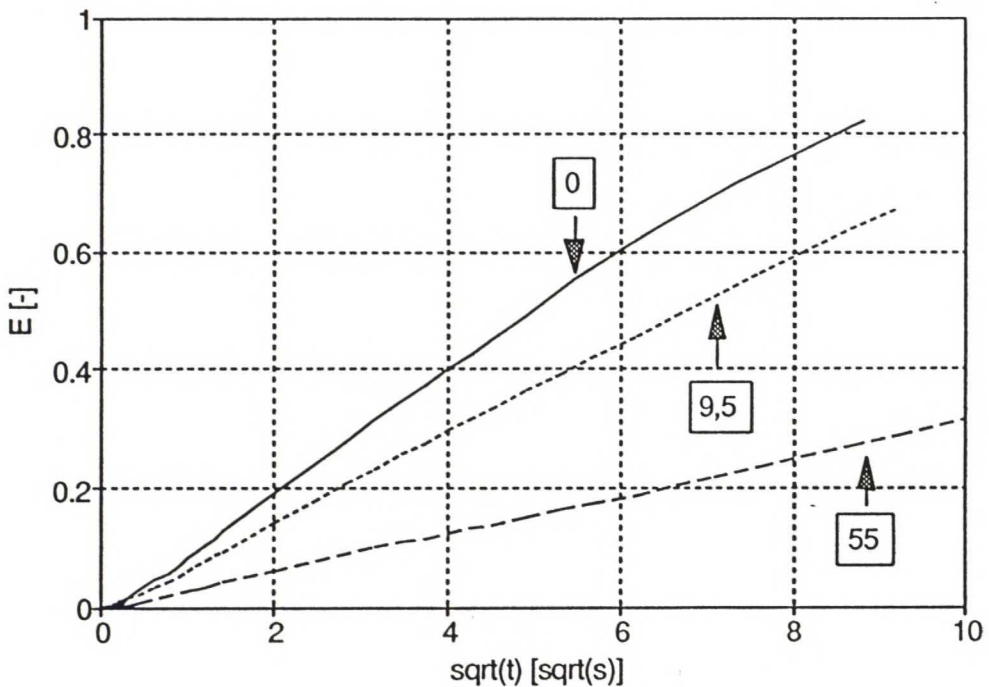
$V_g$  = liiman tilavuus [ $m^3$ ]

$\xi_g$  = liiman kosteuskapasiteetti [-]

Liimatäytteisten solukoiden saavuttamat mallien kosteuskertymät ovat ensimmäisellä mallilla 38,4e-6 kg:aa ja toisella mallilla 92,7e-6 kg:aa. Liiman suuri kosteuskapasiteetti kasvattaa liimatäytteisen solukon toisen mallin tasapainokosteuden kosteuskertymän jopa yli 3,2-kertaiseksi verrattuna liimattomaan solukkoon. Koko mallista liiman tilavuusosuus on vain 28,6 % ja soluseinien 33,8 %.

## 7.5 Suhteellinen painonmuutos

Suhteellisen painonmuutoksen kuvaajia laskettiin noin arvoon 0.6 saakka. Epästationaaristen tarkastelujen aika-askeleeseen käytetty laskenta-aika lähes kaksinkertaistui verrattuna pelkän puusolukon kosteuden siirtymisen tarkasteluun. Kasvuun vaikutti mahdollisesti liiman lisääminen malliin. Lisäksi mallin kyky sitoa kosteutta kasvoi voimakkaasti. Kosteuden siirtoreittien tukkimisesta johtuen kosteus tunkeutui enemmän pääasiallisesta siirtymisen suunnastaan soluseiniin eikä kostuttanut soluseinää toiselta puolelta. Kosteuden siirtymisen pinta-alan soluseinään voidaan katsoa tällöin pienentyneen. Edellisten seurauksena mallin kosteudella kyllästämiseen vaadittava aika kasvoi moninkertaisesti verrattuna liimalla täyttämättömiin malleihin. Esimerkiksi liimatäytteisen solukon 2 laskentaan käytetty aika oli yli 48 tuntia.



Kuva 40. Suhteellisen painonmuutoksen kuvaajat eri liimamäärien laskentatapauksilla. Kuvaajaa edustava numero kertoo liimauksessa käytetyn liimamäärän suuruuden [ $\text{g/m}^2$ ]. Perusmallina on käytetty 14-soluista kennomallia, jossa efektiiviset huokosaukot ovat 640 nm.

Kuvassa 41 on verrattu eri 14-soluisien kennomallien suhteellisen painonmuutoksen kuvaajia. Ylimmäisenä on kuvaaja liimattomasta 14-soluisesta kennomallista. Keskimmäinen kuvaaja on liimatäytteisen solukon  $9,5 \text{ g/m}^2$  liimaa kuvaaja. Alimmaisena on liimatäytteinen solukko joka edustaa laskentatapausta jonka liimasaumassa on liimaa  $55 \text{ g/m}^2$ .

Liimattoman mallin kuvaajassa näkyy pieni alkuviive. Kosteuspitoisuuden saavutettua noin arvon 0.6 alkaa suhteellisen kosteuspitoisuuden kuvaaja loivenemaan. Liimatäytteisen solukon ensimmäisen mallin kuvaaja muistuttaa homogeenisen materiaalin kuvaajaa. Toisen liimalla täytetyn solukon kuvaajassa on havaittavissa pientä aaltoliikettä. Kuvaajassa on alun jälkeen pieni loivempi osuus ja taas noin arvosta 0.3 arvoon 0.5 kasvava osuus. Suhteellisen kosteuspitoisuuden saavutettua arvon 0.5 alkaa kosteuden sitoutuminen hidastua.

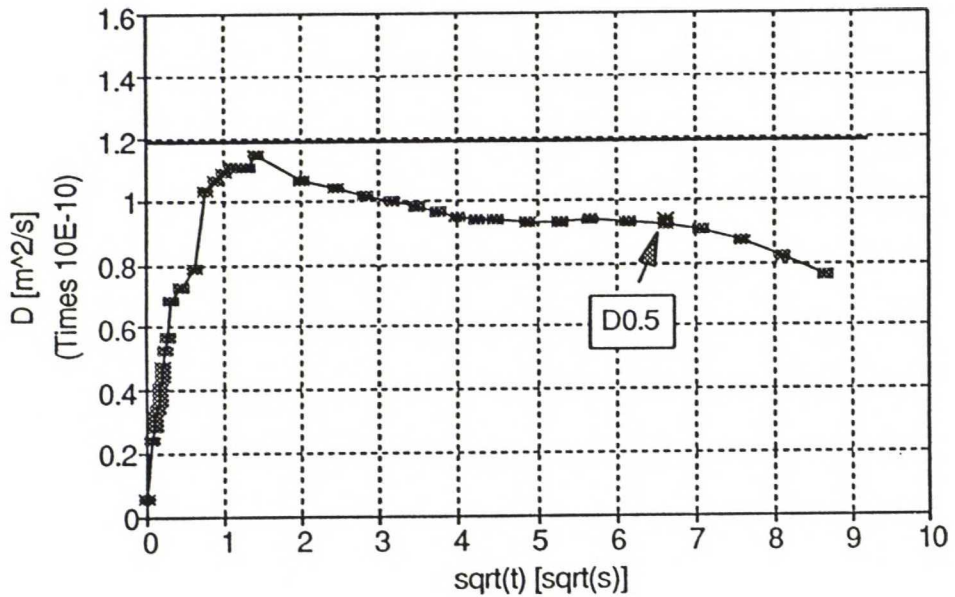
## 7.6 Diffuusiokertoimet

Stationaarisessa tapauksessa diffuusiokertoimet laskettiin kahdella eri pinnansiirtokertoimella. Kuten kosteusvirran tiheydenkin kohdalla ero oli huomattavan pieni. Ensimmäisessä laskentamallissa ero oli 0,5 % ja toisessa mallissa vielä pienempi. Epästationaarisessa tapauksessa käytettiin laskennassa vain pienempää pinnansiirtokerrointa. Samaa pinnansiirtokerrointa käytettiin myös pelkän puusolukon kosteuden siirtymistä tarkasteltaessa. Epästationaarisessa tapauksessa laskettiin myös hetkellisten diffuusiokerrointen arvot. Ensimmäisen liimatäytteisen solukon diffuusiokertoimet on esitetty kuvassa 42. Toisen liimatäytteisen solukon diffuusiokertoimet on esitetty kuvassa 43. Molemmissa kuvissa diffuusiokertoimet ovat ajan neliöjuuren funktiona.

Kuvassa 42 hetkellisen diffuusiokertoimen kuvaajassa on havaittavissa laskennan alkuvaiheessa tapahtuneen pientä värähtelyä. Värähtelykohdat osuvat eri laskenta-ajojen vaihtumisen kohdille. Laskenta-ajoissa on käytetty eri suuruisia aika-askelia, joten kosteusvirrassa on voinut tapahtua pientä värähtelyä ja hetkellistä epätarkkuutta. Hetkellisen diffuusiokertoimen kuvaajassa pienetkin laskentaepätarkkuudet näkyvät voimakkaasti. Kuvassa 43 on havaittavissa sama ilmiö laskennan alussa.



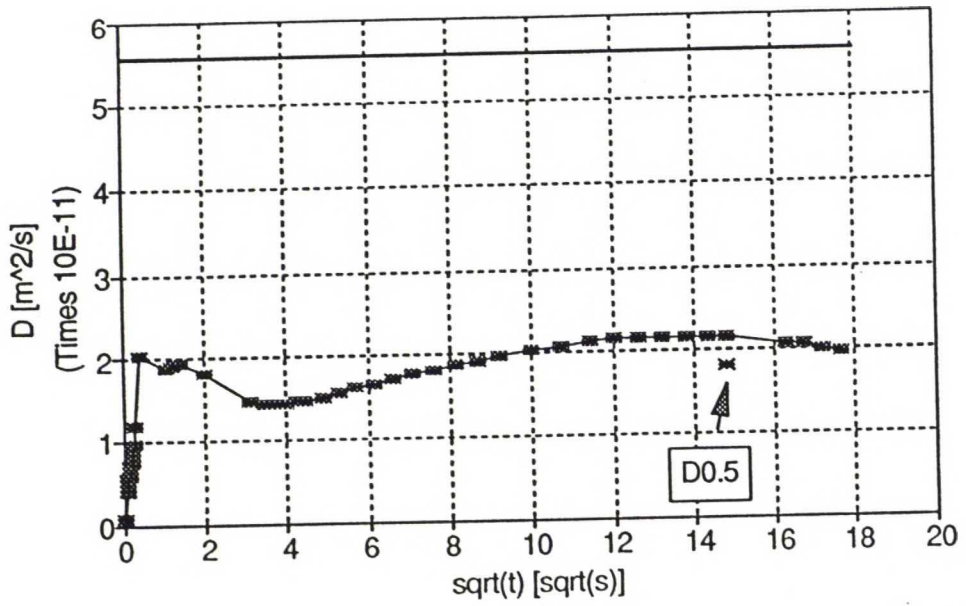
Kuvassa 42 hetkellisen diffuusiokertoimen kuvaaja on lähellä stationaarisen kuvaajan muotoa. Stationaarisen diffuusiokertoimen arvo on kuitenkin noin 2,8 kertainen verrattuna epästationaarisen diffuusiokertoimen arvoon.



Kuva 42. Liimatäytteisen solukon diffuusiokertoimet kun liimaa on noin  $9,5 \text{ g/m}^2$ . Kuvassa hetkellisen diffuusiokertoimen huippu käy lähellä stationaarisen laskennan arvoja. Diffuusiokerroin ajanhetkellä kun suhteellinen painonmuutos on 0,5 osuu hetkellisen diffuusiokertoimen kuvaajalle.

Verrattaessa ensimmäisen liimatäytteen solukon epästationaarisen diffuusiokertoimen arvoa vastaavaan puusolukon diffuusiokertoimeen saadaan suhteeksi 1,8. Suuremman liimamäärän tapaukseen verrattaessa saadaan suhteeksi 9,56. Hetkellisten diffuusiokertoimien maksimiarvoilla samat suhteet ovat 1,9 ja 14,8.

Verrattaessa liimatäytteisten solukoiden liimamääriä saadaan suhteeksi 5,8. Epästationaaristen diffuusiokerrointen suhteeksi saadaan 5,2. Hetkellisten diffuusiokerrointen maksimiarvoille saadaan suhteeksi 7,9. Tulosten analysointia käsitellään liimatäytteen solukon osalta kappaleessa 8.4.



Kuva 43. Liimatäytteen solukon diffuusiokertoimet kun liimaa on noin 55 g/m<sup>2</sup>. Kuvassa hetkellisellä diffuusiokertoimella on kaksi huippua. Stationaarisen laskennan arvo on selvästi epästationaarisia laskentatuloksia suurempi. Diffuusiokerroin ajanhetkellä kun suhteellinen painonmuutos on 0,5 osuu hieman hetkellisen diffuusiokertoimen kuvaajan alapuolelle.

## 8 TULOSTEN TARKASTELU

Soluseinän kosteudensitomiskykyä verrattiin huokosilman kosteudensitomiskykyyn kosteuskapasiteetin suuruudella. Soluonteloiden kosteudensitomiskyky oli paksuseinäisellä neliömallilla 1/12500 soluseinän kosteudensitomiskyvystä. Kenno- ja epäsymmetrisellä mallilla suhde oli 1/26379. Samoin eri tapauksissa käytettyjen soluseinän diffuusiokerrointen suhde huokosilman diffuusiokertoimeen oli samaa suuruusluokkaa kuin kosteuskapasiteettienkin. Eri mallien laskentaparametrien erot johtuivat käytettyjen tarkastelulämpötilojen eroista.

Puunsyiden kyllästymispiste pienenee lämpötilan kasvaessa. Tällöin myös kosteuskapasiteetti ja diffuusiokerroin muuttuvat. Lämpötila vaikuttaa ilman kyllästymiskosteuspitoisuuteen. Tarkastelemalla kosteuden siirtymistä suuremmilla lämpötiloilla ilma sitoo kosteutta enemmän ja puun tasapainokosteus pienenee. Tällöin myös sorptioisotermin muoto muuttuu ja kulmakerroin eli kosteuskapasiteetti pienenee. Tämän tutkimuksen tulokset edustavat vain laskentatapauksissa käytettyjä kahta vakiolämpötilaa.

Kosteuskapasiteetin arvoon vaikuttaa myös erittäin paljon mistä kohdasta sorptioisotermiä kosteuskapasiteetti on laskettu. Kosteuskapasiteetti laskettiin molemmissa tapauksissa sorptiokuvaajan alueelta RH 45 % - 75 %. Laskettu kulmakerroin oli noin 30 % loivempi eli kosteuskapasiteetin arvo 30 % pienempi kuin lineaarinen kuvaaja kosteuspitoisuuksien minimin (RH 0 %) ja maksimin (RH 100 %) välillä.

Mallien diffuusiokertoimet voidaan laskea suhteellisen painonmuutoksen kuvaajan eri osilta. Vertailtavuuden säilyttämiseksi on seuraavassa tarkastelussa käytetty vain kuvaajan osaa 0 - 0.5. Tällöin jokaisessa tarkastelussa on sama pinnansiirtokertoimen vaikutus. Käytetyn pinnansiirtokertoimen vaikutus oli havaittavissa parhaiten neliömallissa.

Materiaaliominaisuuksien, laskennan lähtöarvojen ja mallien geometrinen ominaisuuksien vaikutusta diffuusiokertoimien suuruuteen on tarkasteltu erikseen seuraavissa luvuissa.



*Ohjelma ja työskentely-ympäristön vaikutus simulointiin*

NISA-ohjelmalla voidaan muodostaa vapaasti malleja geometrisen muodon rajoittamatta. Vaikea geometria aiheuttaa kuitenkin ongelmia. Materiaaliominaisuuksien suuri ero huokosilman ja soluseinän välillä aiheuttaa laskentaan epätarkkuutta. Suurten materiaaliominaisuuksien seurauksena joudutaan käyttämään tiheää elementtiverkkoa iteraation värähtelyn vähentämiseksi. Kennomallissa ja epäsymmetrisessä mallissa elementtien muodoista tuli värähtelylle herkempiä. Erityisen herkkiä kohtia ovat elementeissä olevat terävät kulmat lähellä suuria materiaaliominaisuuksien muutoskohtia. Värähtelyn vaikutusta tarkasteltiin pääasiassa kennomallissa eri solmujen kosteuspitoisuushistoriakuvaajien avulla. Laskentatarkkuutta parannettiin lyhentämällä aika-askelta. Värähtely saatiin rajoitetuksi aivan tarkastelun alkuun käyttämällä aika-askelina alussa 0,00001 sekuntia. Aika-askelen pituutena oli lopussa yleensä 0,05 sekuntia.

Värähtelyä oli soluseinän sisällä aivan soluontelon rajan vieressä. Paikallisesti voimakkainta värähtelyä oli aivan mallin kosteuden siirtymisen alkupäässä lähellä efektiivistä huokosaukkoa. Suurimmillaan värähtely oli alle 6 % suhteellisen painonmuutoksen arvosta E on 1. Värähtelyä ei esiintynyt enää 0.008 s:n jälkeen. Tällöin mallin suhteellisen painonmuutoksen arvo ei vielä ollut saavuttanut arvoa 0.005. Värähtelyn merkitystä laskentatuloksiin ei ole tarkasteltu enempää aika-askeleen valinnan jälkeen. Värähtelyn vaikutusten tarkastuksessa käytetyt kuvaajat on esitetty liitteessä M. Kuvaajissa nähdään värähtelyn keskittyminen aivan tarkastelun alkuun. Värähtelyn voidaan todeta olevan riittävän pientä, 0,5 %, ettei sen merkitystä tarvitse huomioida tulosten tarkastelussa.

Laskenta-aika kasvoi osittain myös mallien geometrinen tekijöiden seurauksena. Suurimman ongelman monimutkainen geometria aiheutti tulosten jälkikäsittelevävaiheessa. Kennomallin ja epäsymmetrisen mallin tasa-arvopinta-alakuvien tulostaminen muodostui ohjelman ja laitteiston rajoituksista johtuen erittäin ongelmalliseksi. Nelivärimustesuihkutulostimella tulostuksen onnistuminen oli vaihtelevaa. Tulostamisen onnistumiseen vaikuttivat mm. mallin elementtiverkon tiheys, mallin geometrinen rakenne, tasa-arvovärien

lukumäärä, tulostustiedoston koko ja tulostusajankohta. Kaikkien eri tekijöiden kombinaatioiden jälkeen tulostamisen onnistuminen oli sattumanvaraista. Tasa-arvopinta-alakuvien tulostamisella ei kuitenkaan ollut työn informatiivisen arvon kannalta merkitystä, vaan ne toimivat lähinnä diffuusioita havainnollistavana välineenä. Lopputuloksena päädyttiin käyttämään monitorin valokuvausta. Ohjelmasta ei myöskään saatu suoraan tulostettua malliin kertynyttä kosteusmäärää. Ohjelman jälkikäsitelyä on vielä kehitettävä.

## 8.1 Efektiivisen huokosaukon merkitys kosteuden siirtymiseen

### *Huokosaukon solurakenne*

Puun solurakenne on kosteuden siirtymisen kannalta heterogeeninen. Tukkimalla huokosaukot voidaan rakenteen heterogeenisyyttä hieman homogenisoida. Mallit ovat kuitenkin edelleen heterogeenisiä. Huokosaukkojen tukkimisen jälkeen kosteuden siirtyminen tapahtuu soluseinien ja soluonteloiden kautta. Makroskooppisen diffuusion ei voida olettaa vielääkään täysin noudattavan Fickin lakeja. Fickin lait pätevät vain homogeenisen kappaleen diffuusiota tarkasteltaessa. Taulukkoon 19 kootuista diffuusiokertoimista voidaan helposti havaita huokosaukkojen merkitys diffuusiokertoimiin. Huokosaukottomissa malleissa stationaaristen ja epästationaaristen laskentatapauksien diffuusiokertoimet ovat lähes samat. Vähäiset erot diffuusiokertoimissa voidaan selittää Stammin (1964) mukaisella eri diffuusioreittien rinnan- ja sarjaankytkentöjen avulla tai pinnansiirtokertoimen vaikutuksella diffuusioon. Kennomallin tapauksessa stationaarisissa laskentatuloksissa esiintyi eroja eri pinnansiirtokertoimen arvoilla, liite K. Diffuusiokerrointen erot eri pinnansiirtokertoimilla laskettuina ovat pieniä.

Soluseinissä tapahtuva kosteuden siirtyminen on hitaampaa kuin soluonteloissa tapahtuva. Lisäksi soluseiniin sitoutuu huomattavasti suurempi määrä kosteutta kuin soluonteloihin. Kun kosteuspitoisuuden erojen tasoittumisessa kosteus siirtyy kaikissa reiteissä soluseinän läpi,



soluseinistä tulee kosteuden siirtymisnopeutta hallitseva tekijä. Tällöin umpisoluista rakennetta voidaan pitää diffuusion kannalta homogeenisenä. Diffuusiokertoimien erot eri puolipaksuuksilla olivat erittäin pienet. Eri puolipaksuuksilla diffuusioon kulunut aika oli suoraan verrannollinen kosteuspitoisuuksien erojen tasoittumisen matkaan. Suhteellisen painonmuutoksen kuvaajassa ei ollut havaittavaa kosteuden sitoutumisen viivettä diffuusion alussa. Kokonaisuutena voidaan huokosaukottoman mallin katsoa käyttäytyneen lähes Fickin lakien mukaisesti.

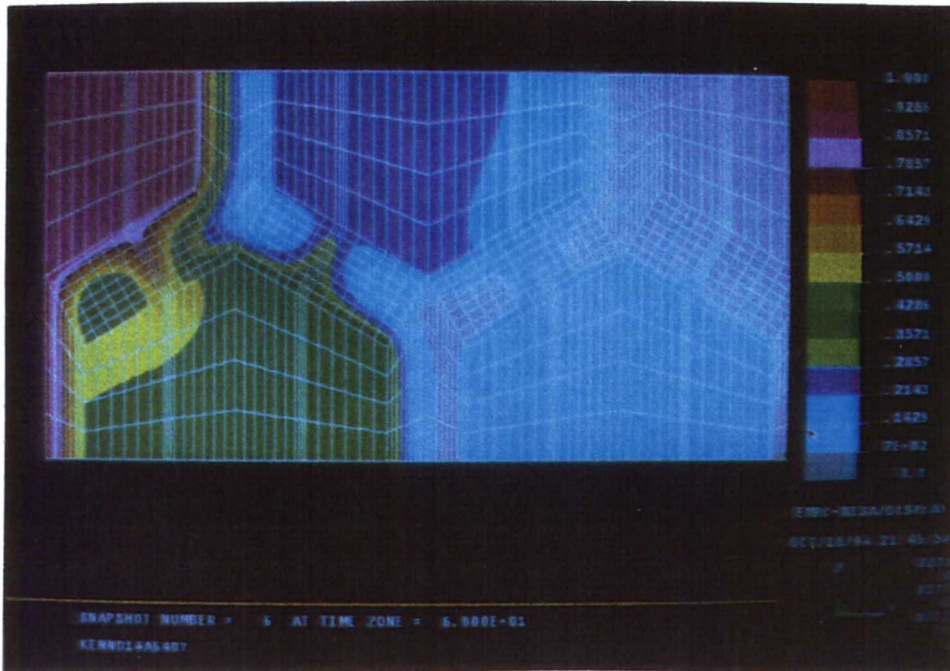
### *Huokosaukollinen solurakenne*

Huokosaukkojen avaamisen jälkeen kosteuden siirtymiselle tulee uusi diffuusioreitti soluontelosta toiseen huokosaukon kautta. Samalla kosteuden sitoutumisen pinta-ala soluseiniin kasvaa, kun kosteusrintama etenee soluseinään samanaikaisesti molemmilta puolilta. Tällöin diffuusiossa makrotasolla Fickin lait eivät suoranaisesti enää päde. Kosteuspitoisuuden erojen tasoittuminen tapahtuu kosteuden siirtymisenä kuvan 17 mukaisten reittien kautta. Diffuusiota voidaan mallintaa eri diffuusioreittien rinnan- ja sarjaankytkentöjen avulla Stammin (1964) mukaisesti.

Efekiiviset huokosaukot toimivat kosteuspitoisuuksien erojen tasoittamista nopeuttavina kanavina. Huokosaukkojen merkitys kosteuden siirtymiseen kasvaa, kun soluseinän paksuutta kasvatetaan. Tällöin huokosaukot syöttävät kosteutta soluonteloihin soluseinien läpi ennen kuin soluseinä on ehtinyt saavuttaa tasapainokosteuden. Soluseinien kostuminen pääsee tapahtumaan molemmilta puolilta soluseinää ja kosteuspitoisuuksien erot tasoittuvat nopeammin. Esimerkkinä kosteuden leviämisestä efekiivisen huokosaukon kautta on kuva 44. Kuvassa on 14-soluisen kennomallin kosteuspitoisuuden erojen tasoittuminen arvosta  $0 \text{ kg/m}^3$  arvoon  $1 \text{ kg/m}^3$  ajanhetkellä 0,6 sekuntia kosteuspitoisuuksien erojen tasoittumisen alusta. Kuvan oikeassa laidassa olevat soluontelot ovat saaneet alkukosteutensa efekiivisten huokosaukkojen kautta. Tällöin soluseinien molemmilla pinnoilla on suurempi kosteuspitoisuus kuin soluseinän sisällä. Kosteuspitoisuuserot tasoittuvat rakenteen sisällä mielivaltaisista suunnista vaikka koko



rakenteen osalta kosteuspitoisuuserojen tasoittumisen aiheuttaa yksidimensioinen gradientti.

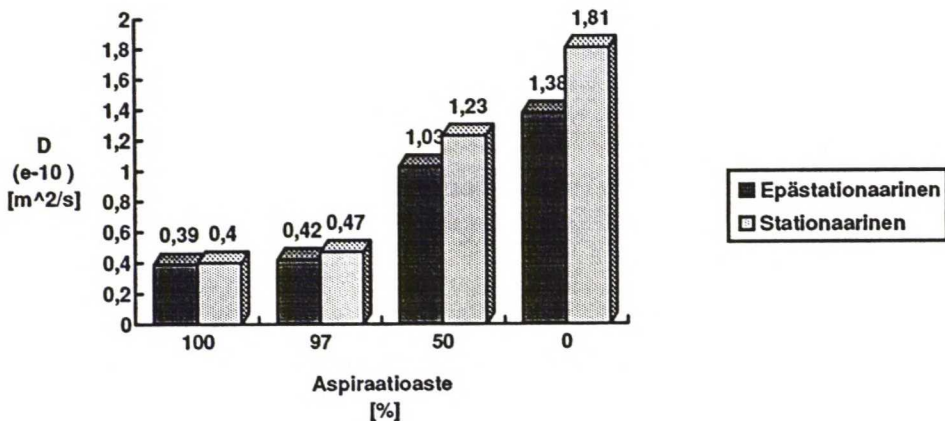


Kuva 44. 14-soluisen kennomallin kosteuspitoisuusjakautuma ajanhetkellä 0,6 s. Efektiivisten huokosaukkojen leveys 640 nm. Kosteus siirtyy efektiivisten huokosaukkojen kautta kostuttamaan soluseinää molemmista soluonteloista. Tämän seurauksena soluseinä kyllästyy kosteudella nopeammin ja kosteuspitoisuuserot tasoittuvat nopeammin. Huokosaukollinen puun solukko on heterogeeninen rakenne ja käyttäytyy Fickin lakien vastaisesti.

Makroskooppisella tasolla puun tiedetään käyttäytyvän anisotrooppisesti. Anisotrooppista käyttäytymistä voidaan perustella mikroskooppisen rakenteen avulla. Koska mikroskooppinen rakenne solukkotasolla on erilainen puun jokaisessa suunnassa, on helppo ymmärtää anisotrooppinen käyttäytyminen makroskooppisella tasolla. Tutkittaessa kosteuden siirtymistä solurakennetasolla ei toistaiseksi ole perusteltua syytä käyttää ortotrooppisia materiaaliominaisuuksia. Kaikki käytetyt materiaaliominaisuudet perustuvat makroskooppisen puun koetuloksiin. Koetulokset eivät pysty huomioimaan puun mikroskooppista rakennetta soluseinän eri kerroksissa. Tunnetuista kosteuden siirtymiseen vaikuttavista tekijöistä soluseinä on pienin yksikkö, jonka

materiaaliominaisuudet tunnetaan. Näin ollen materiaaliominaisuudet valittiin isotrooppisiksi. Anisotropian aiheuttavina muuttujina toimivat mallien solukkorakenne ja dimensiot. Tutkimuksessa oli muuttujana huokosten aspiroitumisaste. Tämän seurauksena geometrisesti kaksidimensioinen malli saatiin käyttäytymään anisotrooppisesti makroskooppisesti yksidimensioisessa kosteuden siirtymisen tapauksessa.

Makroskooppiselta rakenteeltaan yksidimensioisen anisotrooppisen kosteuden siirtymisen esimerkkinä on neljäsoluisen kennomallin diffuusiokerrointen suhde aspiraatioasteeseen. Suhde on esitetty kuvassa 45. Aspiraatioastetta kuvataan efektiivisen huokosaukon muuttuvalla leveydellä. Efektiivisen huokosaukon leveydellä 640 nm aspiraatioaste on 0 %. Kun efektiivistä huokosaukkoa ei ole, kaikki huokokset ovat aspiroituneet ja aspiraatioaste on 100 %. Kuvassa on esitetty diffuusiokerrointen arvot stationaarisessa ja epästationaarisessa tapauksessa.



Kuva 45. Neljäsoluisen kennomallin diffuusiokertoimet suhteessa aspiraatioasteeseen. Eri aspiraatioasteilla saadaan malli käyttäytymään anisotrooppisesti yksidimensioisessa kosteuden siirtymisessä. Heterogeenistä rakennetta kuvaa stationaarisen ja epästationaarisen tarkastelun diffuusiokertoimien välinen ero.

Stationaaristen laskentatapauksien diffuusiokertoimien selvä ero verrattuna epästationaaristen laskentatapauksien diffuusiokertoimiin vahvistaa havaintoja puun Fickin lain vastaisesta käyttäytymisestä. Efektiivisten huokosaukkojen ollessa auki, mallissa on kosteuden

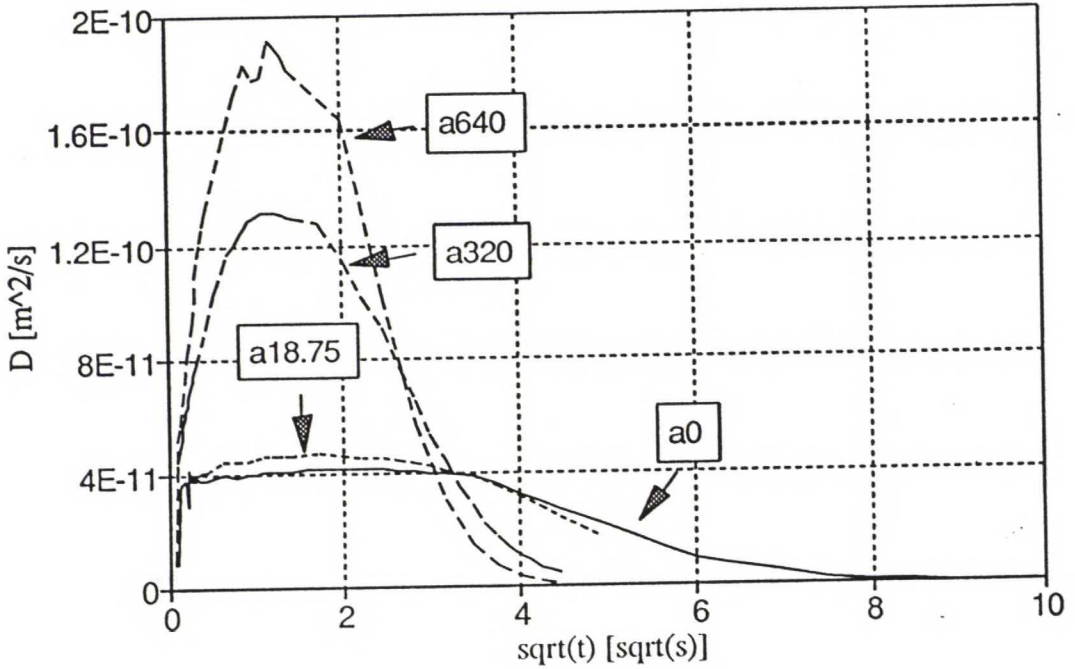


siirtymiselle nopea reitti. Stationaarisessa analyysissä oletetaan kosteuden sitoutumisen jo tapahtuneen tasaisesti ja vallitsevana ilmiönä on vakiosuuruisen kosteuden siirtyminen rakenteen läpi. Tarkastelussa ei voida eritellä eri ajanhetkillä siirtynyttä kosteuden määrää. Epästationaarisessa tarkastelussa alussa tapahtuu voimakasta kosteuden siirtymistä soluonteloiden ja huokosaukkojen kautta. Tällöin kosteuden sitoutuminen tapahtuu suuremmalla pinta-alalla nopeasti. Kun kosteusvirran tiheyksiä kirjataan eri tarkasteluajanhetkillä, voidaan nopea kosteuden siirtyminen havaita suhteellisen painonmuutoksen kuvaajan sitoutumisen viiveenä sorption alkuvaiheessa, esimerkiksi kuvasta 29. Osa viiveestä selittyy pintavastuksen vaikutuksella. Kaikkien huokosten ollessa aspiroitumattomia, diffuusiokerroin kasvoi nelisoluisessa kennomallissa 3,6 kertaiseksi verrattuna malliin jossa kaikki huokokset ovat aspiroituneet. Vertailu tehtiin suhteellisen painonmuutoksen arvon 0.5 ajanhetkillä. Aspiraatioasteella 50 % diffuusiokerroin oli 2,6-kertainen ja aspiraatioasteella 97 % vastaava arvo oli 1,1.

Huokosaukollisen rakenteen Fickin lakien vastainen käyttäytyminen näkyy havainnollisesti hetkellisen diffuusiokertoimen kuvaajasta. Hetkellinen diffuusiokerroin noudattaa aspiroituneilla malleilla stationaarisen analyysin kuvaajan muotoa. Aspiraatioasteen pienentyessä hetkellinen diffuusiokerroin saa selvän huipun joka on lähellä stationaarisen analyysin arvoja. Hetkellisen diffuusiokertoimen voimakas kasvu johtuu suurista hetkellisistä suhteellisista painonmuutoksista lyhyellä ajanjaksolla. Nelisoluisen kennomallin hetkellisen diffuusiokertoimen arvoja eri efektiivisen huokosaukon leveydellä on esitetty kuvassa 46.

Suurilla efektiivisillä huokosaukoilla kosteuden sitoutumisen viivästyminen näkyy jyrkkänä hetkellisen diffuusiokertoimen muotona. Samalla diffuusiokertoimen arvo kasvaa ja hetkellisen diffuusiokertoimen kuvaajalle tulee selvä huippu. Kosteuspitoisuuksien erojen tasoittuessa hetkellisen diffuusiokertoimen arvo lähestyy vakiota.





Kuva 46. Nelisoluisen kennomallin hetkellisen diffuusiokertoimen arvoja. Kuvaajiin viittaavat numerot ilmoittavat kuvaajaa vastaavan efektiivisen huokosaukon leveyden nanometreinä.

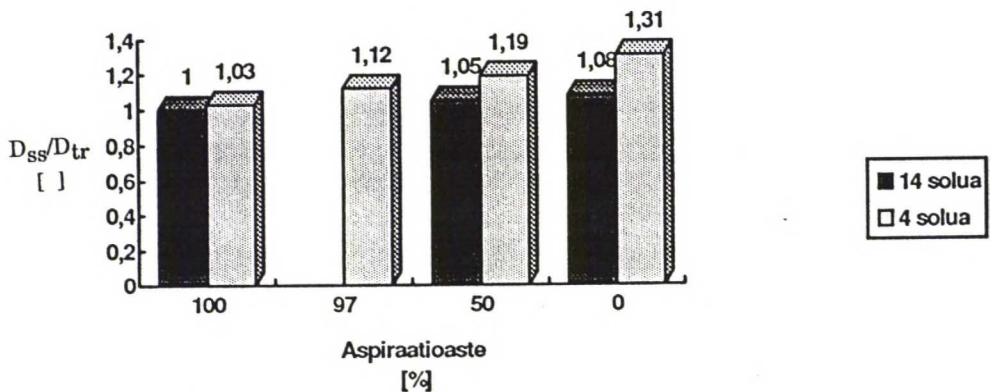
## 8.2 Puolipaksuuden merkitys kosteuden siirtymiseen

Kuten edellisessä luvussa mainittiin huokosaukottomissa malleissa puolipaksuudella ei ole vaikutusta kosteuden siirtymiseen. Huokosaukollisissa malleissa puolipaksuudella voidaan havaita selvä vaikutus diffuusiokertoimen arvoon. Paksuusriippuvuus on eräs puulla havaittu Fickin lain vastainen piirre.

Puolipaksuuden vaikutusta voidaan kuvata vertailemalla mallien stationaarisen ( $D_{ss}$ ) ja epästationaarisen ( $D_{tr}$ ) analyysin diffuusiokertoimen suhdetta. Suhteiden vertailu perustuu käytettyjen laskentamenetelmien laskentatapaan. Stationaarisessa laskennassa lopputilanteessa mallin toisessa päässä vallitsee suurempi kosteuspitoisuus ja toisessa päässä pienempi kosteuspitoisuus. Stationaarinen laskenta antaa kosteusvirralle vakioarvon eri kosteuspitoisuuksien välillä. Fickin II:n lain mukaan epästationaaritilassa

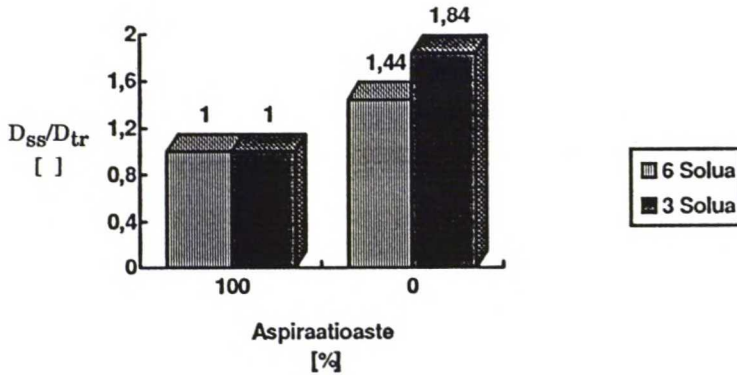
homogeenisen kappaleen kosteuspitoisuuden muutos on ajan suhteen muuttuva. Mallinnuksessa pinnansiirtokertoimen vaikutus pyrittiin poistamaan. Tällöin suhteellisen painonmuutoksen arvon välillä 0 - 0.5 hetkellisistä kosteusvirroista muodostetun diffuusiokertoimen pitäisi olla identtinen verrattaessa sitä stationaarisen ratkaisun kokonaiskosteusvirrasta muodostettuun diffuusiokertoimeen. Stationaarisen ja epästationaarisen ratkaisun diffuusiokertoimien välisen suhteen poikkeaminen arvosta 1 kuvaa kappaleiden poikkeamista kosteuden siirtymisen kannalta homogeenisestä rakenteesta.

Stationaarisen ja epästationaarisen tapauksen vertailu eri aspiraatioasteissa olevien eri paksuisten kennomallien kesken on esitetty kuvassa 47.



Kuva 47. Stationaarisen ja epästationaarisen analyysin diffuusiokerrointen suhteiden vertailu kennomallilla. Kuvassa 14:n solun ja 4:n solun eri aspiraatioasteissa olevien mallien diffuusiokertoimien suhteet.

Diffuusiokertoimien suhteiden muuttumisesta puolipaksuuksien muuttuessa, voidaan havaita puolipaksuuden vaikutus puun Fickin lain vastaiseen kosteuden siirtymiseen. Puolipaksuudella 42  $\mu\text{m}$  (4 solua) diffuusiokerrointen väliset suhteet ovat aspiraatioasteella 50 % 1,13 kertaa ja aspiraatioasteella 0 % 1,21 kertaa suuremmat kuin puolipaksuudella 147  $\mu\text{m}$  (14 solua). Suuremman puolipaksuuden diffuusiokerrointen väliset suhteet ovat kaikilla aspiraatioasteilla melko lähellä yhtä. Puolipaksuutta kasvattamalla lähestytään Fickin lain mukaista kosteuden siirtymistä. Vastaavaa käyttäytymistä havaitaan neliömallin tuloksissa, kuva 48.



Kuva 48. Stationaarisen ja epästationaarisen analyysin diffuusiokerrointen suhteiden vertailu neliömallilla. Kuvassa 6:n solun ja 3:n solun eri aspiraatioasteissa olevien mallien diffuusiokertoimien suhteet.

Huokosaukottomassa neliömallissa kosteuden siirtyminen noudattaa Fickin lakeja. Molempien laskenta-analyysien diffuusiokertoimet ovat samat. Huokosaukollisessa mallissa havaitaan jo selvästi Fickin lain vastaista kosteuden siirtymistä. Puolipaksuuden kasvaessa efektiivisen huokosaukon vaikutus kosteuden siirtymiseen pienenee ja malli alkaa lähestyä Fickin lain mukaista käyttäytymistä. Kennomallin ja neliömallin tulokset ovat samansuuntaiset. Paksuusvaikutus on selvästi suurempi 14:n solun kennomallissa, jossa on myös selvästi ohuimmat soluseinät verrattuna kuuden solun neliömalliin.

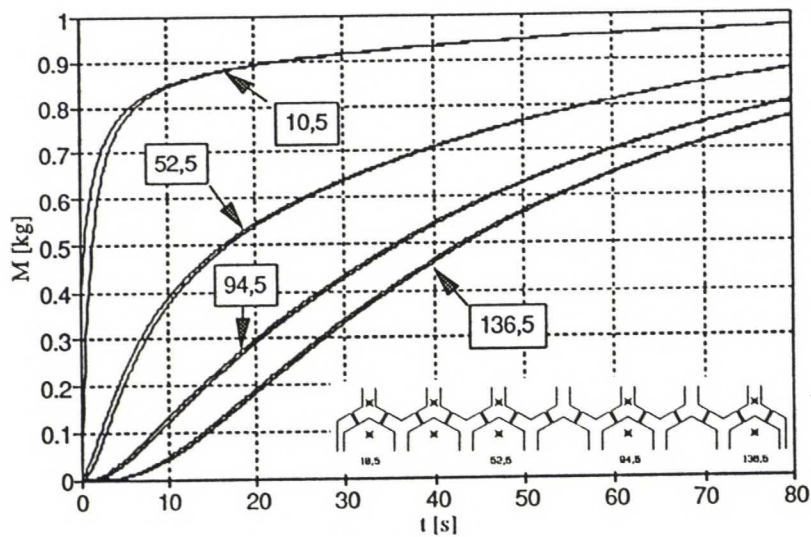
Puolipaksuudella ei ole merkittävää vaikutusta kosteusvirran tiheyteen aivan kosteuspitoisuuksien erojen tasoittumisen alkuvaiheessa. Puolipaksuuden vaikutusta kosteusvirran tiheyteen verrattiin kennomallilla kuvassa 26. Kosteusvirta on voimakkainta alussa ennen 0.5 sekuntia. Ohuimmilla puolipaksuuksilla suuri kosteusvirran tiheys ja nopea kosteuden siirtyminen vaikuttavat huomattavan kauan verrattuna mallin suhteellisen painonmuutoksen arvoon. Kennomallin kosteusvirran tiheyden suhde suhteelliseen painonmuutokseen on esitetty liitteessä J. Kosteusvirran tiheyksien kuvaajat ovat saman muotoisia mutta selvästi eri vaiheessa eri suhteellisen painonmuutoksen arvoilla.

Malleissa puolipaksuuden kasvattamisella ei tehty solukkorakenteeseen vaikuttavia muutoksia. Laboratoriokokeiden koekappaleiden puolipaksuuden kasvattamisen yhteydessä tapahtuu todennäköisesti



ohuilla koekappaleilla suuriakin rakenteellisia muutoksia, koska keskimääräisen vuosikasvun paksuus on noin 1,74 mm ja kesäpuuosuus voi vaihdella 10 % - 40 %. Rengashuokosten lukumäärä ja samalla efektiivisen huokosaukon koko on suoraan verrannollinen kesäpuosuuteen. Ohuilla koekappaleilla heterogeeninen rakenne vaikuttaa suoraan koetuloksiin. Lisäämällä puolipaksuutta saadaan heterogeenisen rakenteen vaikutusta pienennettyä ja kosteuden siirtymisen nopeuden määrääväksi tekijäksi tulee rakenteen kesäpuuosuus. Paksummilla kappaleilla kesäpuun paikallisen soluseinän paksuusvaihtelun vaikutus tasoittuu useiden vuosikasvujen ylitse ulottuvan kosteuspitoisuuden erojen tasoittumisen seurauksena.

Heterogeenisen rakenteen vaikutus mallin eri solmujen kosteuspitoisuuteen näkyy kuvassa 49. Kuvassa on tarkasteltu ajan funktiona solmujen kosteuspitoisuutta eri osassa mallia. Tarkasteltavat syvyydet mallin pinnasta olivat arvoilla 10,5  $\mu\text{m}$ , 52,5  $\mu\text{m}$ , 94,5  $\mu\text{m}$  ja 136,5  $\mu\text{m}$ .



Kuva 49. 14-soluisen kennomallin solmujen kosteuspitoisuuksia eri osassa mallia. Mallissa efektiivisen huokosaukon leveys on 640 nm. Mallin puolipaksuus on 147  $\mu\text{m}$ . Kuvaajaparin ylempi viiva kuvaa solmua keskellä soluonteloa ja alempi solmua keskellä soluseinää. Mallin keskellä olevat solmut alkavat kostua jo alkuvaiheessa.

Kuvassa 49 havaitaan jokaisella tarkastelusyvytydellä soluontelon kosteuspitoisuuden olevan alussa hieman korkeampi kuin soluseinän.

Syvemmillä mallissa soluontelon ja soluseinän kosteuspitoisuuden erojen tasoittuminen kestää kauemmin kuin mallin pinnassa. Kosteuspitoisuuserot ovat sorption alussa pienempiä syvemmillä mallissa. Kuvaajista voidaan havaita mallin olevan selvästi heterogeeninen rakenteeltaan. Kosteuden sitoutumista tapahtuu samanaikaisesti soluseinän molemmilta puolilta eri osissa mallia. Loivempi kosteusgradientti näkyy alhaisena kosteuspitoisuutena mallin pinnassa ja suurena kosteuspitoisuutena mallin sisällä. Kokonaisuutena kosteuspitoisuuserot tasoittuvat nopeasti tehokkaan kosteuden siirtymisen ja suuren kosteuden sitoutumispinta-alan ansiosta. Diffuusion paksuusvaikutus näkyy kappaleen heterogeenisen rakenteen mukaisen kosteuden siirtymiskäyttäytymisen alkaessa muistuttaa homogeenisempaa, kun mallin puolipaksuus kasvaa. Eri puolipaksuuksien ja aspiraatioasteiden vaikutusta suhteelliseen painonmuutoksen on esitetty liitteen N tasa-arvopinta-alakuvaajissa.

### 8.3 Mallin muodon ja dimensioiden vaikutus kosteuden siirtymiseen

Eri laskentamalleilla Fickin lain vastainen kosteuden siirtyminen näkyi eri voimakkuudella. Myöhäistä kesäpuuta edustavassa neliömallissa näkyy selvemmin Fickin lain vastainen kosteuden siirtyminen kuin pienisoluista varhaista kesäpuuta edustaneessa kennomallissa. Kevätpuusolukkoa edustaneessa epäsymmetrisessä mallissa solukon geometria vaikutti selvästi eri laskenta-analyysien kosteuden siirtymisen laskentatulosten tarkasteluun. Eri mallien laskentatuloksia voidaan vertailla suuruusluokkatasolla. Eri materiaaliominaisuuksilla lasketut eri mallien tulokset eivät ole keskenään kytkettävissä edustamaan solukkomallien kombinaatioita. Tuloksien yhdistelyssä pitää olla varovainen ja ymmärtää käyttämiensä tulosten alkuarvojen vaikutus yhdistelyyn.

Neliömallissa efektiivinen huokosaukko on suoraan yhteydessä korkeamman kosteuspitoisuuden reunaehtopintaan. Kosteusvirran tiheys huokosaukon kautta on alussa 16 kertaa suurempaa kuin soluseinän läpi. Ajanhetkellä 4 sekuntia porrasmaisen kosteuspitoisuuden muutoksen alusta kosteusvirran tiheys on noin 140 kertaa suurempaa efektiivisen



huokosaukon kautta kuin soluseinän läpi. Kun huomioidaan elementtiin kohdistuva kosteusvirta (kuva 24) menee kosteutta aluksi enemmän soluseinän läpi kuin efektiivisen huokosaukon kautta. Elementtiin kohdistuva kosteusvirta ilmoittaa elementtiin siirtyneen kosteuden määrän kapasiteetin laskennassa käytettyä yksikköä kohti.

Kennomallissa kosteutta siirtyy jatkuvasti enemmän mallin ylälaidasta puolittuneen, reunaehtopintaan avoimen soluontelon kautta, kuin suoraan soluseinän läpi. Kosteus siirtyy nopeasti soluontelon läpi suoraan suuren kosteuskapasiteetin omaavaan soluseinään asti. Tämän jälkeen kosteus siirtyy efektiivisten huokosaukkojen kautta seuraavaan soluonteloon. Pääasiallinen kosteusvirta pysyy jatkuvasti reitillä *soluontelo - efektiivinen huokosaukko*. Aspiroitumattomien huokosten mallilla puolittuneen soluontelon ja soluseinän kosteusvirran tiheyksien suhde on alussa 1,5 ja neljän sekunnin kuluttua noin 6,5. Aspiroituneiden huokosten mallilla suhde on alussa noin 1,35 ja neljän sekunnin jälkeen vain noin 1,04. Alussa oleva ero johtuu suuremmasta kosteuden sitoutumispinta-alasta. Soluseinien tasopainokosteuden saavuttamisen jälkeen kosteuden siirtyminen on lähes yhtä suurta suoraan soluseinän läpi kuin puolittuneen soluontelon kautta.

Epäsymmetrinen malli muistuttaa korkeamman kosteuspitoisuuden puoleisesta päädyistä kennomallia. Kun epäsymmetrisellä mallilla tehdään samat tarkastelut kuin kennomallilla saadaan puolittuneen soluontelon ja soluseinän kosteusvirrantiheyden suhde. Suhde on alussa noin 4,4-kertainen ja kolmen sekunnin kuluttua noin 14-kertainen. Ero kennomallin arvoihin johtuu epäsymmetrisen mallin 1,27 kertaa paksummasta soluseinästä sekä 3,6 kertaa leveämmästä efektiivisestä huokosaukosta.

Neliömallissa kosteuden siirtymistä huokosaukkojen kautta on huomattavasti nopeampi reitti syvemmälle rakenteisiin ennen soluseinien tasapainokosteuden saavuttamista. Kennomallissa tai epäsymmetrisessä mallissa reitin vaikutus ei ole niin voimakas kuin neliömallissa. Neliömallin soluseinien ja soluonteloiden suhteet korostavat Fickin lain vastaista kosteuden siirtymistä. Kosteuspitoisuuserojen tasoittumista paksuissa soluseinissä nopeutti pienempi kosteuden sitomiskyky korkeamman lämpötilan (293 K) vaikutuksesta verrattuna kennomalliin tai



epäsymmetriseen malliin. Huokosaukollisessa neliömallissa paksut soluseinät ovat keskeltä selvästi alhaisemmassa kosteuspitoisuudessa kuin seuraavat soluontelot. Lisäksi neliömallin korostetun suuret efektiiviset huokosaukot lisäävät huokosaukkojen kosteuden siirtymistä seuraaviin soluonteloihin ennen sitoutumista soluonteloiden välissä olevaan soluseinään. Efektiivisten huokosaukkojen suuri kosteuden syöttö näkyy kuvassa 43. Kuvan alalaidassa oleva mustana näkyvä elementtien tihentyminen on avoin efektiivinen huokosaukko. Kuvassa huokosaukon leveys on symmetrian takia vain 37,5 nm.

Kuvassa 50 kosteuspitoisuuserot ovat useimmissa soluonteloissa tasoittuneet huomattavasti ennen soluseinien sisäosia. Efektiivisen huokosaukon kosteuspitoisuuksia tasoittava vaikutus yltää lähes samanaikaisesti usean solukerroksen ylitse. Kennomallissa efektiivisen huokosaukon kautta tapahtuva kosteuden syöttö solusta toiseen ei vaikutta niin syvälle rakenteeseen (kuva 44).



Neliömallin nopea kosteuden siirtyminen soluonteloissa selittyy myös soluseinän kosteuskapasiteetilla. Neliömallissa käytettiin kosteuskapasiteettinä 2,1 kertaa pienempää arvoa, jolloin soluseinien kosteudensitomiskyky oli pienempi kuin kennomallissa ja epäsymmetrisessä mallissa.

Mallien geometrisellä muodolla vaikutettiin kosteuden siirtymisreitien pituuteen. Pelkän kosteuden siirtymisreitien pituuden vaikutusta diffuusioon ei tutkittu. Tutkimuksen perusteella diffuusioon vaikuttaa enemmän kosteuden siirtymisreittillä kuluva aika kuin reitin pituus. Pituutta haluttiin kuitenkin minimoida ja mallintaa todellisuutta muistuttavilla geometrioilla, joihin ei olla differenssimenetelmän geometristen rajoituksien vuoksi pystytty. Epäsymmetrisen mallin geometrisellä rakenteella eivät tulokset poikkea merkittävästi symmetrisestä tapauksesta. Työ kasvaa kuitenkin oleellisesti. Diffuusion kannalta keskeisemmät tekijät olivat mukana myös geometrialtaan yksinkertaisemmissa neliö- ja kennomalleissa.

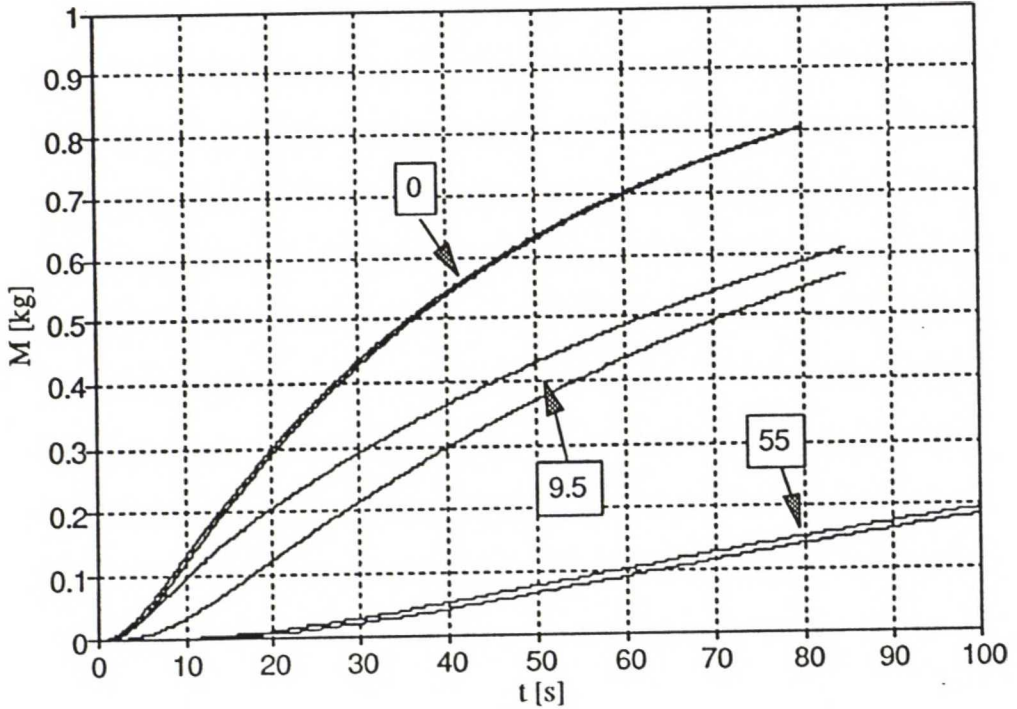
#### 8.4 Puusolukossa olevan liiman merkitys kosteuden siirtymiseen

Kuusen solukkorakenteeseen perustuvan kosteuden siirtymisen mallintamisen suorana sovellutuksena tutkittiin liimatäytteen solukon merkitystä kosteuden siirtymiseen. Liimalla oletettiin olevan kosteuden siirtymistä sulkeva vaikutus solurakenteessa. Liimatäytteen solukon kosteussulun omaista käyttäytymistä ei kuitenkaan tunnettu, vaan sitä pyrittiin mallintamaan ottamalla tarkasteluun mukaan kovettuneen liiman aineominaisuudet ja oletettu solukon liimallatäyttymistapa. Liimalla täytettiin soluonteloita kokonaan ja osittain. Liimalla täytetyistä soluonteloista soluseinissä olevat efektiiviset huokosaukot täytettiin liimalla.

Liima on erittäin kosteuskapasitiivinen osa-aine verrattuna soluseinään. Lisäksi liiman diffuusiokerroin on lähempänä ilman diffuusiokerrointa kuin soluseinän diffuusiokerrointa. Edellä mainittujen seikkojen seurauksena liimalla voidaan muodostaa kosteuskapasitiivinen sulku



kosteuden nopealle etenemiselle soluontelossa. Kosteuden siirtyminen hidastuu huomattavasti mallissa olevan liimamäärän kasvaessa.



Kuva 51. 14-soluisen aspiroitumattoman kennomallin solmujen kosteuspitoisuuden arvoja syvyydellä 94,5  $\mu\text{m}$  pinnasta. Kuvaajapareja osoittavat luvut ilmoittavat mallissa olleen liimamäärän. Kuvaajapareissa alempi kuvaaja on suuremman kosteuskapasiteetin omaava solmu. Solmupareista toinen on soluseinän keskeltä ja toinen soluontelon keskeltä.

Kosteuspitoisuuden erojen tasoittumisen hidastuminen näkyy kuvassa 51 samalla ajanhetkellä saavutettuna pienempänä suhteellisena painonmuutoksena. Kuvaajat edustavat 94,5  $\mu\text{m}$ :n syvyydellä pinnasta olevia solmuja. Liimattoman mallin (0  $\text{g}/\text{m}^2$ ) tapauksessa kuvaajaparista ylempi on soluontelon keskellä oleva solmu ja alempi soluseinän keskellä oleva solmu. Liimalla täytettyjen solukoiden malleilla (9,5  $\text{g}/\text{m}^2$  ja 55  $\text{g}/\text{m}^2$ ) ylempi kuvaaja kuvaajaparissa on soluseinän keskellä oleva solmu ja alempi liimatäytteen soluontelon keskellä oleva solmu. Liimamäärät ovat teollisen tuotannon kannalta aivan liian pieniä. Kvalitatiivisesti tilanne vastaa todellisuutta, sillä myös solujen koko on vastaavasti keskimääräistä pienempi. Liimalla täyttyneiden solukerrosten lukumäärä on

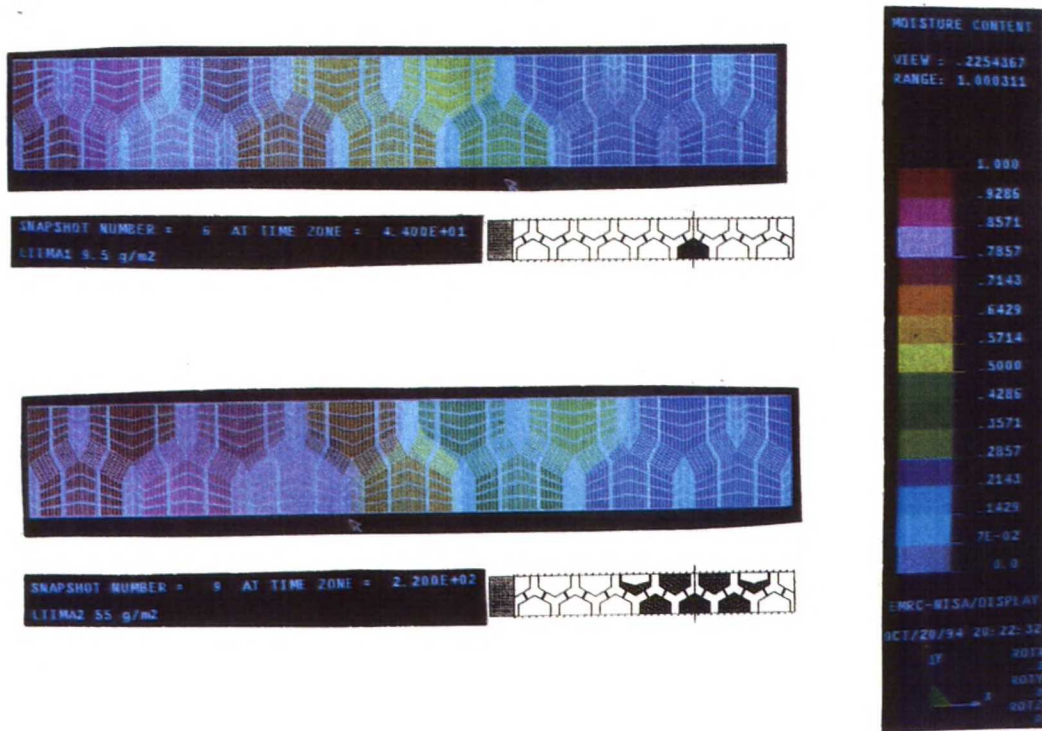


puuviilutuotteissa käytännössä tyypillisesti esitettyjen laskentatapauksien välissä.

Kosteus saavuttaa liimattomassa mallissa ja  $9,5 \text{ g/m}^2$  liimaa olevassa mallissa yhtä nopeasti soluseinän sisällä olevan solmun. Tämä näkyy kuvassa 51 kuvaajien yhtenäisenä muotona ajanhetkeen viisi sekuntia saakka. Tämän jälkeen liimalla täytetty soluontelo alkaa dominoida kosteuden sitoutumista. Kosteus ei pääse kiertämään soluseinän taakse ja siten kosteuden sitoutumisen pinta-ala soluseinään pienenee. Rajapintaan muodostuu kerros, jossa on suuria kosteuspitoisuuseroja. Liimalla täytetty soluontelo pystyy sitomaan itseensä kosteutta kapasiteetiltään lähes kolminkertaisen määrän verrattuna soluseinään. Soluseinän kiertämiseen liimatäytteiseen soluonteloon kuluu huomattavasti aikaa. Liimalla tässä tapauksessa vähennettiin kosteuden siirtymistä soluseinän läpi siirtämällä merkittävä osa kapasiteetista liimatäytteiseen soluonteloon ja tukkimalla huokosilman kautta tapahtuva siirtymisreitti. Kosteuspitoisuuserojen tasoittumiseen kuluu tällöin huomattavasti enemmän aikaa.

Suhteellisen painnonmuutoksen arvon 0.5 saavuttamiseen kului liimattomalta mallilta 24 sekuntia. Kun mallissa oli liimaa  $9.5 \text{ g/m}^2$  kului aikaa 1.8 kertaa enemmän. Liimamäärällä  $55 \text{ g/m}^2$  aikaa kului 10 kertaa enemmän kuin liimattomalla mallilla. Liimatäytteisten solukoiden kosteuspitoisuusjakautumien tasa-arvopinta-alakuvaajat ajanhetkillä 44 ja 220 s on kuvassa 52. Ylemmässä kuvassa nuoli osoittaa liimatäytteistä solua ja alemmassa liimatäytteisen solukon alkamista. Kosteuspitoisuuksien erojen nopeat muuttumiset kohdistuvat liimakerroksen alkuun ja liimatäytteisen solukon alueella olevien soluseinien kohdille. Liimatäytteisen solukon jälkeen kosteus etenee *soluontelo - huokosaukko* reitin kautta nopeasti seisovan ilman soluonteloissa.

Mallien kosteuden siirtymisen sulkevaa vaikutusta voidaan pitää erittäin tehokkaana vaikkakin luonteeltaan efektiivistä sitoutumisen pinta-alaa pienentävänä ja kosteuskapasitiivisenä. Yritystä tehdä liimalla kosteussulku solukkorakenteeseen voidaan pitää onnistuneena mutta ei välttämättä halutulla tavalla.



Kuva 52. Liima täytteisten solukkojen kosteuspitoisuuksien tasa-arvopinta-alakuvaajat. Ylemmässä kuvassa liimaa  $9,5 \text{ g/m}^2$  ja alemmassa  $55 \text{ g/m}^2$ . Ajanhetki kuvissa on kun suhteellinen painonmuutos on 0,5. Kuvissa näkyy jyrkät kosteuspitoisuuserot liiman ja solukon rajakerroksessa.

Liimatäytteisen solukon ensimmäisellä laskentamallilla ( $9,5 \text{ g/m}^2$ ) hetkellisen diffuusiokertoimen kuvaajan muoto, kuva 42, oli samankaltainen kuin 50 % aspiraatioasteella olevalla mallilla. Toisella laskentamallilla, kuva 43, kuvaajaa voi verrata täysin aspiroituneiden huokosten malliin. Liimatäytteisten solukoiden hetkellisten diffuusiokerrointen kuvaajien ominaispiirteenä on kaksi huippua. Ensimmäinen huippu on laskennan alussa, kun kosteus siirtyy huokosaukon kautta ensimmäisen soluseinän takana olevaan soluonteloon. Kosteus siirtyy normaalisti liimalla täytettyihin soluonteloihin asti. Kosteuden siirtymisen kohdatessa liiman muodostuu rajakerros, jossa kosteuspitoisuuserot ovat selvät. Liimassa kosteus siirtyy nopeasti suhteessa sitoutumiseen. Kosteuspitoisuuserojen tasoittuminen on hidasta liiman suuren kosteuskapasiteetin vaikutuksesta sekä liimakerroksen sisällä olevien soluseinien hitaan kosteuden siirtämiskyvyn vaikutuksesta. Toinen huippu hetkellisen diffuusiokertoimen kuvaajassa löytyy, kun suhteellinen painonmuutos on saavuttanut arvon 0.5. Tätä ennen liima on sitonut itseensä kosteutta ja kosteuden siirtyminen on ollut nopeaa



liimalla täytettyjen solujen sisällä. Suhteellisen painonmuutoksen saavutettua arvon 0,5 alkaa kosteuden siirtyminen soluseinien vaikutuksesta hidastua. Diffuusion nopeutta säättää soluseinien tasapainokosteuden saavuttamiseen kuluva aika.

Liimatäytteisten solukoiden stationaaristen ja epästationaaristen tapauksien diffuusiokerrointen vertailu antaa suhteiksi 1,3 ja 3,1. Suhteellisen painonmuutoksen kuvaajia katsottaessa mallit näyttäisivät käyttäytyvän hyvin Fickin lain mukaisesti. Stationaarinen ja epästationaarinen analyysi antaa kuitenkin toisistaan vahvasti poikkeavat diffuusiokertoimet. Tämä selittyy epästationaarisessa analyysissä kosteuden tasaisella virralla mallin keskelle, jossa alkaa voimakas kosteuden sitoutuminen kosteuskapasitiiviseen liimaan. Kosteuden siirtyminen on siis aluksi rinnan ja sarjaan kytkettyjen reittien kosteuden siirtymistä. Kohdatessaan liiman kosteusvirtaa rajoittaa lisäksi sarjaan kytketty liiman kosteudenvastus. Ohitettuaan liiman kosteudenvastukset ovat taas kuvan 17 mukaisia. Liima toimii osittain samalla tavalla kuin aspiroitunut huokonen.

Yksi liimasauma tekee mallista heterogeenisen ja samalla kapasitiivisen. Useimmilla liimasaumoilla malli alkaa muistuttaa homogeenisempää rakennetta. Liimasauman paksuudella voidaan pidentää kosteuspitoisuuden erojen tasoittumiseen kuluva aika. Peräkkäisten liimasaumojen voidaan olettaa pienentävän diffuusiokerrointa etenkin sorption alussa, sekä diffuusiokäyttäytymisen lähestyvän homogeenisen aineen tapausta ja Fickin lakia.



## 9 PÄÄTELMÄT

Solurakenteeseen perustuvan kosteuden siirtymisen mallintamisen kannalta puu koostuu vesihöyryllä täytetyistä soluonteloista, soluonteloita rajoittavista soluseinistä ja soluseinissä sijaitsevista rengashuokosista. Tarkastelulämpötilassa 293 K soluonteloiden huokosilman ja soluseinien kosteuskapasiteettien suhde on  $1/12500$  ja diffuusiokerrointen suhde on  $588/1$ . Puusolukon tiheys vaihtelee kevätpuun  $250 \text{ kg/m}^3$  kesäpuun  $600\text{--}1200 \text{ kg/m}^3$ .

Havupuut ovat solukkorakenteeltaan verrattain samanlaisia. Huokosten aspiroitumisessa kuusen ja männyn välillä on merkittäviä eroja mm. sydänpuun ja pintapuun käyttäytymisen osalta. Mallien geometria ja rengashuokosten tarkastelu perustuu kirjallisuustutkimukseen kuusen rakenteesta. Kuusen kesäpuuosuus voi vaihdella 10 % - 40 %. Kevätpuussa soluseinän paksuus on noin  $2\text{--}3 \mu\text{m}$  ja kesäpuussa noin  $4,5\text{--}5,5 \mu\text{m}$ . Rengashuokosten lukumäärä trakeidissa vähenee maksimissaan 300:sta aina muutamaaan kymmeneen suoraan verrannollisesti tiheyden kasvamiseen kevätpuun vähitellen muuttuessa kesäpuuksi. Kevätpuusolujen rengashuokosten on havaittu olevan huomattavasti herkempiä aspiroitumaan kuin jopa aspiroitumattominakin pidettyjen kesäpuusolujen rengashuokosten. Huokoskokojen mittaustulokset vahvistivat kirjallisuudesta löytyviä margon aukkojen kokoa koskevia tietoja. Kesä- ja kevätpuun huokoskokojakaumat olivat erilaisia. Kevätpuu näytteistä havaittiin selvä pienten huokoskokojen osuuksien huippu, joka oli margon aukkojen koko alueella. Kesäpuun pienempien soluonteloiden ja harvemman rengashuokosten esiintymisen seurauksena huokoskokojen jakautuminen ei ollut yhtä selkeää kuin kevätpuussa. Makroskooppisen kosteuden siirtymisen kannalta solurakenne on huokoinen ja heterogeeninen materiaali. Fickin lait pätevät makroskooppisessa diffuusiassa homogeenisella materiaalilla.

Huokosaukottomassa sekä täysin aspiroituneiden rengashuokosten solukoissa kosteuspitoisuuden erojen tasoittumisessa kosteus siirtyy kaikissa reiteissä *soluseinän* läpi. Soluseinistä muodostuu kosteuden siirtymisnopeutta hallitsevia tekijöitä. Diffuusion voidaan katsoa mallinnuksen tulosten perusteella noudattavan Fickin lakeja. Tällöin

täysin aspiroituneiden rengashuokosten puusolukkoa voidaan pitää makroskooppisen diffuusion kannalta homogeenisenä rakenteena.

Rengashuokosten huokosaukkojen avautumisen jälkeen kosteuden siirtymiselle tulee uusi kosteudensiirtymisreitti *soluontelo - huokosaukko*. Puun solurakenne muuttuu diffuusion kannalta heterogeeniseksi. Alussa kosteuden siirtyminen soluonteloihin viivästyy pinnan karheuden aiheuttaman ominaispinta-alan kasvun vaikutuksen verran. Neliömallilla ominaispinta-ala oli minimissä ja viivästymisen suurinta. Tämän sitoutumisviiveen jälkeen huokosaukot ja soluontelot siirtävät kosteutta nopeasti syvemmällä sijaitseviin kapasitiivisiin osiin rakennetta. Kosteuden sitoutuminen kapasitiivisiin soluseiniin tehostuu sorption alkuvaiheessa kosteuden siirtyessä soluseinien takana oleviin soluonteloihin. Epästationaarisessa diffuusiassa kosteuspitoisuuserot tasoittuvat rakenteen sisällä mielivaltaisista suunnista, vaikka koko rakenteen osalta kosteuspitoisuuserojen tasoittumisen aiheuttaa yksidimensiainen gradientti. Samanaikaisesti useasta suunnasta tapahtuvalla kosteuden sitoitumisella soluseiniin sitoutumisen efektiivinen pinta-ala kasvaa ja diffuusio nopeutuu. Fickin laeista poikkeavan diffuusion osuus korostuu, kun soluseinät ovat paksuja tai avoimien huokosaukkojen lukumäärä on suuri.

Fickin laeista poikkavaa diffuusiota kuvaava stationaarisen ja epästationaarisen diffuusion suhde pieneni kennomallin pienien kesäpuusolujen aspiroitumattomien rengashuokosten tapauksessa 1,31:stä 1,08:n, kun mallin puolipaksuus kasvaa 42  $\mu\text{m}$ :stä 147  $\mu\text{m}$ :n. Puolipaksuuden kasvaessa kosteuspitoisuuserojen tasoittumiseen kuluva aika kasvaa. Viivästyneen epästationaarisen sitoutumisen osuus ja pintavastuksen kosteuden siirtymistä hidastava osuus kokonaisajasta pienenee. Syyn suuntaisessa diffuusiassa soluontelon pituus on 100-kertainen soluontelon halkaisijaan verrattuna. Kosteudensiirtymisreitti *soluontelo - huokosaukko* on sama kuin säteen suuntaisessa diffuusiassa. Näin ollen voidaan olettaa syyn suuntaisen diffuusion paksuusriippuvuuden olevan samankaltaista kuin säteen suuntaisen. Syynsuuntaisessa diffuusiassa vaikutus alueen voidaan olettaa ulottuvan suurempiin paksuuksiin. Laboratoriokoetulokset tukevat tätä olettamusta.



Diffuusiassa on havaittu laboratoriokokeissa selvää tiheysvaikutusta. Laboratoriokokeiden ohuiden koekappaleiden Fickin laeista poikkeavaa diffuusiota voidaan selittää heterogeenisellä rakenteella. Lisäämällä puolipaksuutta saadaan heterogeenisen rakenteen vaikutusta pienennettyä. Useamman vuosikasvun omaavissa koekappaleissa kesäpuuosuus stabiloituu. Samalla kosteuspitoisuuserojen tasoittumisen nopeuden määrääväksi tekijäksi tulee rakenteen kesäpuuosuus eli varsin homogeeninen rakenne.

Fickin laeista poikkeavaan kosteuskäyttäytymiseen vaikuttavat myös tämän tutkimuksen rajauksen ulkopuolelle jätetyt kappaleen sydänpuuosuus ja ydinsäteiden osuus. Kuivatussa sydänpuussa huokokset ovat aspiroituineet. Tällöin homogeenisena pidettävä sydänpuusolukko hidastaa diffuusiota. Ydinsäteet siirtävät kosteutta säteen suunnassa osan kosteudesta levitessä viereisiin soluihin.

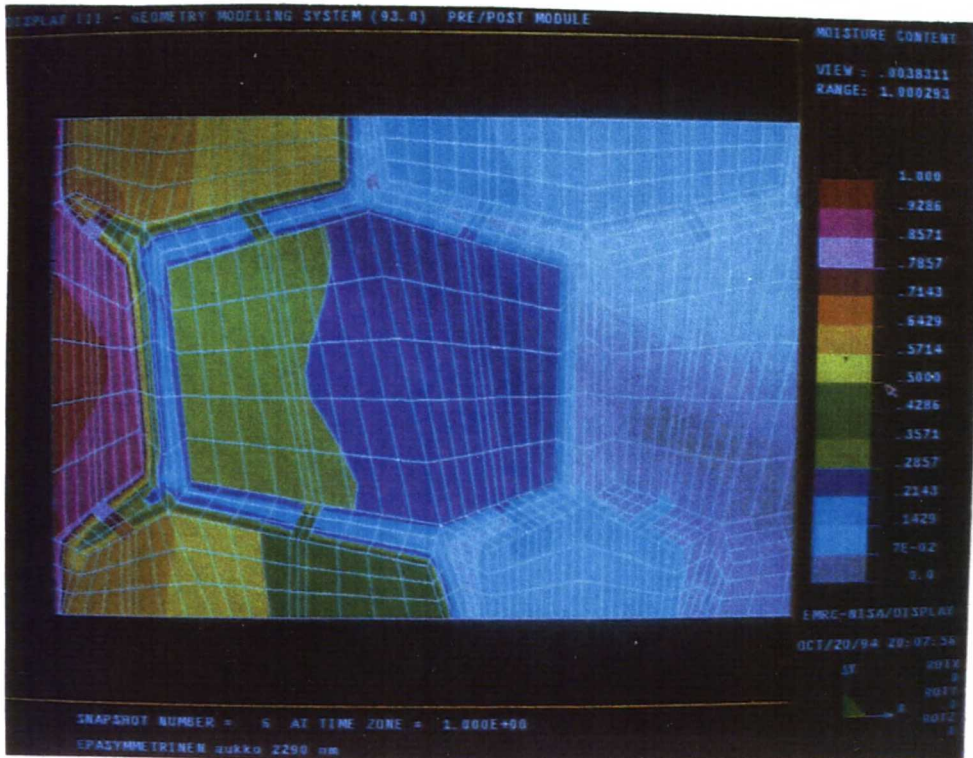
Tämän tarkastelun diffuusiokertoimia ei voida suoranaisesti yhdistellä ja käyttää eri tiheyksisten kappaleiden mallintamiseen. Myöhäistä kesäpuuta edustanut neliömalli, varhaista kesäpuuta edustanut kennomalli ja kevätpuuta edustanut epäsymmetrinen malli ovat dimensioiltaan ja materiaaliominaisuuksien lähtöarvoiltaan yhteensopimattomia. Mallit on rakennettu ensisijaisesti Fickin lakien vastaista kosteuskäyttäytymistä havainnoillistamaan. Diffuusiokerrointen suuruusluokkavertailu vahvistaa kuitenkin mallien tulosten olevan lähellä laboratoriokokeiden tuloksia. Vertailuissa on huomioitava myös malleissa käytetty pintavastustuksen arvo. Pintavastukselle ei haluttu antaa kosteuden siirtymistä hidastavaa vaikutusta. Osaltaan tämän seurauksena malleilla lasketut diffuusiokertoimet ovat suurempia kuin laboratoriokoetulokset ja vastaavat jonkin verran paksumpien koekappaleiden arvoja.

Solukkomallin sovelluksen avulla saatiin uutta tietoa myös liiman ja puun rajapinnan kosteuskäyttäytymisestä. Liimatäytteistä solukkoa tutkittaessa havaittiin sorptiokokeessa liiman sitovan itseensä kosteutta lähes kolminkertaisen määrän verrattuna soluseinään. Mallinnuksessa kosteuden kohdatessa liimatäytteisen solukon kosteuspitoisuuserot kasvavat rajakerroksessa jyrkästi. Liimalla täytetty soluontelo ohjaa kosteusvirtaa itseensä. Liimatäytteisellä solukkoalueella



kosteuspitoisuuserojen aiheuttavaa gradienttia vastaan tapahtuvan kosteusvirran osuus pienenee. Liiman sisällä kosteus siirtyy nopeasti mutta kosteuspitoisuuserot tasoittuvat hitaasti. Liima tukkii soluontelon ja huokosaukot, joten kosteudensiirtymisreittiä *soluontelo - huokosaukko* ei esiinny liimatäytteisellä solukkoalueella. Kosteuspitoisuuserojen tasoittumisen nopeuden määrää liimatäytteen solukon sisällä olevien soluseinien hidas kosteuden siirtokyky ja liiman suuri kosteuden sitomiskyky. Yksi liimasauma tekee mallista heterogeenisen ja samalla kapasitiivisen. Liimasaumojen lisääntyessä malli lähestyy homogeenisempaa rakennetta. Kosteuspitoisuuserojen tasoittumiseen kului simuloinnin mukaan vanerituotteilla jopa kymmenkertaisesti enemmän aikaa verrattaessa samanpaksuiseen puuhun. Liiman kosteuden siirtämistä hidastavaa vaikutusta voidaan pitää erittäin tehokkaana vaikkakin luonteeltaan kapasitiivisenä.

Mallinnuksen tuloksena vahvistui asetettu hypoteesi epästationaarisen diffuusion merkityksestä laboratoriokokeissa havaittujen ohuiden koekappaleiden puun ja puukomposiittien Fickin laeista poikkeavaan kosteuskäyttäytymiseen. Makroskooppisella solukkotasolla Fickin laeista poikkeavaa kosteuskäyttäytymistä onnistuttiin kuvaamaan kahden samanaikaisen siirtymisilmiön, soluseinän ja soluonteloiden huokosilman avulla. Rinnakkaisten kosteudensiirtymisreittien vaikutus Fickin laeista poikkeavaan kosteuden siirtymiseen näkyy kuvassa 53. Kosteuden siirtyminen on tässä tapauksessa täysin Fickin lakien mukaisen homogeenisen rakenteen kosteuden siirtymisen vastainen. Esimerkki homogeenisen rakenteen kosteuden siirtymisestä näkyy liitteessä E. Makroskooppinen diffuusio on epästationaarista heterogeenisessä aineessa kuten puussa. Diffuusio noudattaa paikallisesti soluseinä - soluontelotasolla Fickin lakeja. Mallintaminen perustuu paikallisesti Fickin lakeihin, jolloin voidaan käyttää valmiita tietokoneohjelmia. Diffuusiokerrointen ja kosteuskapasiteettien suuret erot sekä rinnakkaiset kosteudensiirtymisreitit aiheuttavat Fickin laeista poikkeavaa kosteuskäyttäytymistä. Puolipaksuuden kasvaessa useista osatekijöistä muodostuu eri osa-alueiden diffuusioita dominoiva tekijä, jolloin makroskooppinen diffuusio lähestyy Fickin lakien mukaista kosteuskäyttäytymistä.



Kuva 53. Heterogenisessä kappaleessa vallitsee Fickin laeista poikkeava epästationaarinen diffuusio. Epäsymmetrisen mallin kosteuspitoisuuden tasa-arvopinta-alakuvaaja ajanhetkellä 1 s. Suhteellisen painonmuutoksen arvo on tällöin 0,1.

Jatkokehityksenä voidaan samalla menetelmällä ratkaista erilaisten solukerrostojen diffuusiokertoimia, joilla on samat materiaaliominaisuuksien lähtöarvot. Erilaisia solukkerroksia voivat olla kevä- kesä-, sydän- ja pintapuusolukot. Solukkojen diffuusion vaihtelua voidaan mallintaa syyn, säteen ja tangentin suunnissa sekä eri aspiraatioasteen vaihtelulla. Lisäksi voidaan mallintaa ydinsäteiden vaikutusta diffuusioon. Puuviilutuotteissa voidaan tutkia yksittäisten ja kerroksellisten liimasaumojen sekä sorvaushalkeamien merkitystä diffuusioon. Erilaisten solukerrostojen diffuusiokerrointen rinnan- ja sarjaankytkentöjen yhdistelyillä voidaan mallintaa suurempien erityyppisistä ja -paksuisista solukerroksista koostuvien solukkojen diffuusiota. Käytetty menetelmä oli nyt laskentakapasiteetin äärirajoilla, joten käytännön mittoihin siirryttäessä tarvitaan suurempaa laskentakapasiteettia.



## LÄHDELUETTELO

Absetz, I. Koponen, S. Lehtinen M. Effects of Cell and Cell Wall Structure on Mechanical and Moisture Physical Properties of Wood, Annual Report II 1993, Espoo: Helsinki University of Technology, Laboratory of Structural Engineering and Building Physics, 1993. 38 s.

Absetz, I. Koponen, S. Moisture Transport in Wood as a Cellular Material, Käsikirjoitus kurssijulkaisuun Nordic post Graduate Course, Basic Building Physics Mathematical Modelling, Lund 1994. Espoo: Helsinki University of Technology, Laboratory of Structural Engineering and Building Physics, 1994. 19 s.

Bruun, H. Slungaard, S. Investigation of Porous Wood as Pulp Raw Material. Paperi ja Puu, 1959. Vol. 41, nro 2, s. 31-34

Choong, E. T. Fogg, P. J. Moisture Movement in Six Wood Species. For. Prod. Jour., 1968. Vol. 18, nro 5, s. 66 - 70.

Comstock, G. L. Physical and Structural Aspects of the Longitudinal Permiability of Wood. State University College of Forest at Syracuse University. Ph. D. Thesis. Michigan, USA 1968. 285 s.

Crank, J. The Mathematics of Diffusion, Second edition. Oxford Science Publications, 1983

Dinwoodie, J. M. Timber Its Nature and Behavior. New York, Cincinnati, Toronto, London, Melbourne: Van Nostrand Reinhold Company 1980. 190 s.

Fengel, D. The Ultrastructure of Cellulose from Wood. Wood Science and Technology, 1969. Vol. 3, s. 203-217.

Fengel, D. Structure and Function of the Membrane in Softwood Bordered Pits. Holzforschung, 1972. Vol. 26, nro. 1, s. 1-9

Hosia, M. Lindhom, C.-A. Toivanen, P. & Nevalainen, K. Undersökningar rörande utnyttjandet av barrträdsgrénar som råmaterial för kemisk massa och hård fiberskiva I. Paperi ja puu, 1971. Vol. 53, nro. 2, s. 49-66.



Hämäläinen, J. Pennala, E. Vanerien kostumisen ja kuivumisen teoreettinen ja kokeellinen tarkastelu. Espoo: TKK, Lujuusopin laboratorio. Espoo 1981. 52 s.

Jensen, W. Puukemia. Suomen paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja. 2 painos. Turku 1977. s. 7-81.

Kollman, F. Côté, W. JR. Principles of Wood Science and Technology, Vol. 1. Solid Wood. Berlin, Heidelberg, New York: Springer - Verlag, 1968. 592 s.

Koponen, H. Puutuotteiden liimaus. Espoo: Otatieto, 1990. 142 s. ISBN 951-672-100-1

Koponen, S. Toratti, T. Kanerva, P. Modelling Longitudinal Elastic and Shrinkage Properties of Wood. Wood Science and Technology, 1989 Vol. 23, s. 55-63

Koran, Z. Interttrcheid Pitting in the Radial Walls of Black Spruce Tracheids. Wood Science, 1974. Vol. 7, nro. 2, s.111- 115.

Koskelo, T. Puun rakenneksityiskohtien tutkiminen valo- ja pyyhkäisyelektronimikroskoopilla. Espoo: Diplomityö. TKK, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, Talonrakennustekniikka. 1992. 178 s.

Kärkkäinen, M. Puu sen rakenne ja ominaisuudet Helsinki: 1977. 442 s. ISBN 951-99123-3-9

Laming, P. B. ter Welle, B.J.H. Anomalous Tangential Pitting in *Picea Abies* Karst. (European Spruce). IAWA Bull. 1971. Vol. 4. s. 3-7.

Liese, W. Bauch, J. On the Bordered Pits in Conifers. wood Science and Technology, 1967. Vol. 1, s 1-13.

Liu, J. Y. Mathematical Relationship Between Desorption and Sorption Solutions. Drying Technology, 1993. Vol 11, nro 5, s. 961-975.

Liu, T. Moisture Diffusivities and Sorption Isotherms of Swedish Spruce and Pine. Stocholm, Sweden: Byggnadsmateriallära, Kungliga Tekniska Högskolan Raport. TRITA-BYMA 1989:8. 60 s.

Liu, T. Moisture Transport in Wood and Wood-based Panels; A Mathematical Model of Hygroscopic Moisture Transport in Conifer Wood. Stockholm, Sweden: Träteknik Centrum Rapport I 8810063, Byggnadsmateriallära, Kungliga Tekniska Högskolan Raport TRITA-BYMA 1988:5. 54 s.

Nakano, T. Non-steady state water adsorption of wood. Wood Science and Technology. 1994. Vol. 28, s. 359-363.

NISA II, User's Manual for PC, Mini, Supermini, Mainframe & Supercomputers, Version 92.0. Michigan, USA 1992.

Ollinmaa, P. J. Reaktiipuututkimuksia. Teoksessa: Suomen metsätieteellinen seura (toim.) Acta Forestalia Fennica 72.1 Helsinki 1961. s. 5-51.

Pyykkö, M. Kasvianatomia. Kolmas laajennettu painos. Helsinki: Gaudeamus, Helsinki 1979. 292 s.

Pyykkö, M. Puuanatomian kurssi 52549. Helsinki: Helsingin yliopiston kasvitieteen laitoksen monisteita 84. Biologian koulutusohjelman vaihtoehtoinen aineopintojakso, 1983. 71 s.

Sachs, I. B. Kinney, R. E. Bordered Pit Margo - Improved Method for Specimen Preparation. Wood Science, 1974. Vol. 6, nro. 3, s. 200-205.

Siau, J. F. Transport Processes in Wood. Berlin, Heidelberg, New York, Tokio: Springer - Verlag, 1984. 245 s.

Simpanen, M. Puun ja ilman rajakerroksen kosteustekniset ominaisuudet puuviilulevyissä. Espoo: Käsikirjoitus diplomityöstä. TKK, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, Talonrakennustekniikka 1994

Skaar, C. Wood-Water Relations. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer - Verlag 1984. 283 s.

Stamm, A. J. Bound Water Diffusion into Wood in the Fiber Direction. Forest Products Journal, 1959. Vol. 9. nro. 1. s. 27-32.

Stamm, A.J. Wood and Cellulose Science. New York , USA: The Ronald Press Company 1964, 549 s.

Thomas, R. J. Nicholas, D. D. The Ultrastructure of the Ray Tracheid Bordered Pit Membranes in Southern Pine. Tappi, 1967. Vol. 52, nro 11, s. 2160-2163.

Tsoumis, G. Anatomical characteristics of redwood (*Sequita sempervirens* (D.Don) Endl.) of seed and sprout origin. IAWA Bull., 1974. nro. 2, s. 11-17.

Wadsö, L. Studies of Water Vapour Transport and Sorption in Wood. Lund: Doctoral Dissertation, Report TVBM-1013, Building Materials, Lund University 1993. 102 s.



## Solurivin digitointitulokset

Kuvasta 3 digitoitujen kolmanneksi ylimmän rivin solujen tiheydet, soluseinien keskimääräinen paksuus, kokosolun pinta-ala ja kulmien lukumäärä. Digitointijärjestys oli vasemmalta oikealle. Kaksi ensimmäistä solua ovat kevätpuun soluja ja loput kesäpuun soluja. Digitoitavan mikroskooppikuvan teki Tuuli Timonen Helsingin yliopiston kasvitieteenlaitos. Näyte on etelä-suomalaisesta kuusesta.

Järjestys nro	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	S.seinän h [10 <sup>-6</sup> m]	Kiint. [%]	Huok. [%]	Ala [10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> ]	Kulmia
1	324.12	2.76	21.61	78.39	1425.76	6
2	402.98	3.49	26.87	73.13	1371.24	6
3	1330.04	6.21	88.67	11.33	237.21	5
4	1189.49	6.29	79.3	20.7	362.16	6
5	1150.7	6.36	76.71	23.29	416.87	6
6	1149.39	8.16	76.63	23.37	551.91	6
7	1041.34	7.24	69.42	30.58	604.92	6
8	1038.09	6.2	69.21	30.79	444.17	5
9	996.11	6.18	66.41	33.59	449.28	5
10	950.42	5.86	63.36	36.64	590.97	6
11	987.2	6.36	65.81	34.19	640.55	6
12	827.6	5.73	55.17	44.83	681.87	5
13	733.02	5	48.87	51.13	714.42	5
14	895.21	6.47	59.68	40.32	839.02	6
15	789.11	5.46	52.61	47.39	788.23	6
16	771.52	4.78	51.43	48.57	648.09	6
17	821.32	5.71	54.75	45.25	756.15	6
18	768.93	5.51	51.26	48.74	800.03	6
19	649.56	4.6	43.36	56.64	622.95	4
20	744.37	5.2	49.62	50.38	816.76	6
21	737.29	5.16	49.15	50.85	786.88	6
22	695.61	4.8	46.37	53.63	697.96	5
23	663.54	4.29	44.24	55.76	757.91	6
24	623.19	4.23	41.55	58.45	785.73	6
25	641.5	4.44	42.77	57.23	781.92	6

# Eteläsuomalaisen kuusen mikroskooppikuvista lasketut solumuotojen jakautumat

Molemmat mikroskooppikuvat olivat eteläsuomalaisesta kuusesta. Mikroskooppikuvat oli tehnyt Tuuli Timonen, Helsingin yliopiston kasvitieteenlaitos ja Taina Koskelo, TKK. Näytteistä laskettiin solumuotojen jakautuminen.

## Yhteensä

	NÄYTE 1 Tainan valmistama näyte		NÄYTE 2 Tuulin valmistama näyte		YHTEENSÄ	
kulmia	kpl	%	kpl	%	kpl	%
7	11.0	0.8	4.0	0.4	15.0	0.6
6	497.0	38.1	238.0	23.2	735.0	31.5
5	544.0	41.7	414.0	40.4	958.0	41.1
4	252.0	19.3	354.0	34.5	606.0	26.0
3	2.0	0.2	15.0	1.5	17.0	0.7
	1306.0	100.0	1025.0	100.0	2331.0	100.0

## Ydinsäteen viereiset kerrokset

kulmia	kpl	%	kpl	%	kpl	%
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	24.0	10.4	23.0	10.5	47.0	10.4
5	136.0	59.1	106.0	48.2	242.0	53.8
4	68.0	29.6	91.0	41.4	159.0	35.3
3	2.0	0.9	0.0	0.0	2.0	0.4
	230.0	100.0	220.0	100.0	450.0	100.0

## Vuosiluston kevätpuunpuoleiset kerrokset

kulmia	kpl	%	kpl	%	kpl	%
7	0.0	0.0			0.0	0.0
6	4.0	7.0			4.0	7.0
5	10.0	17.5			10.0	17.5
4	43.0	75.4			43.0	75.4
3	0.0	0.0			0.0	0.0
	57.0	100.0	0.0	0.0	57.0	100.0

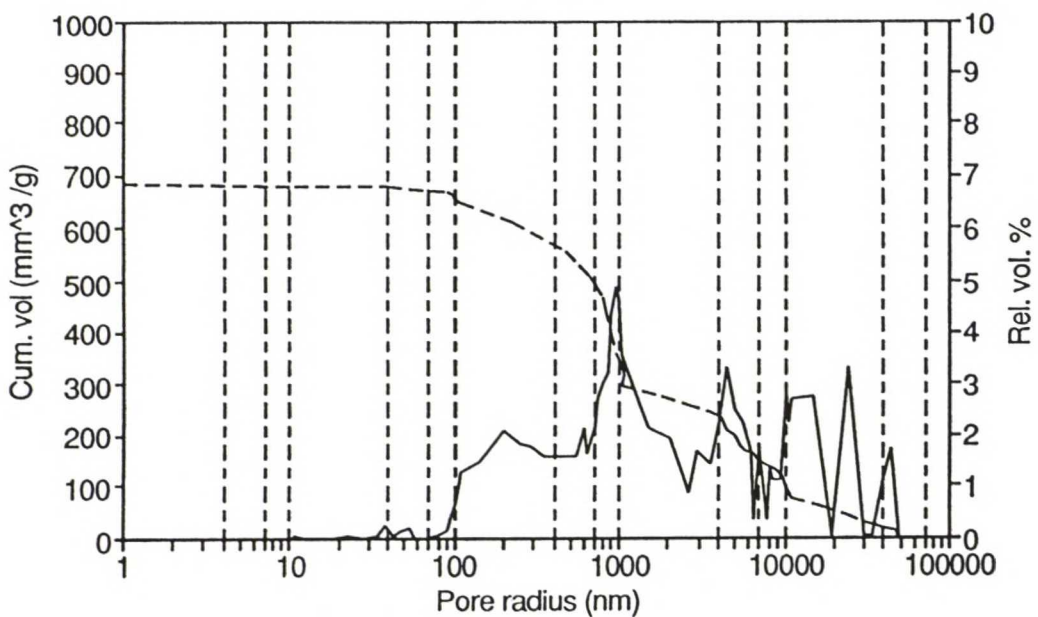
## Muut

kulmia	kpl	%	kpl	%	kpl	%
7	11.0	1.1	4.0	0.5	15.0	0.8
6	469.0	46.0	215.0	26.7	684.0	37.5
5	398.0	39.1	308.0	38.3	706.0	38.7
4	141.0	13.8	263.0	32.7	404.0	22.1
3	0.0	0.0	15.0	1.9	15.0	0.8
	1019.0	100.0	805.0	100.0	1824.0	100.0

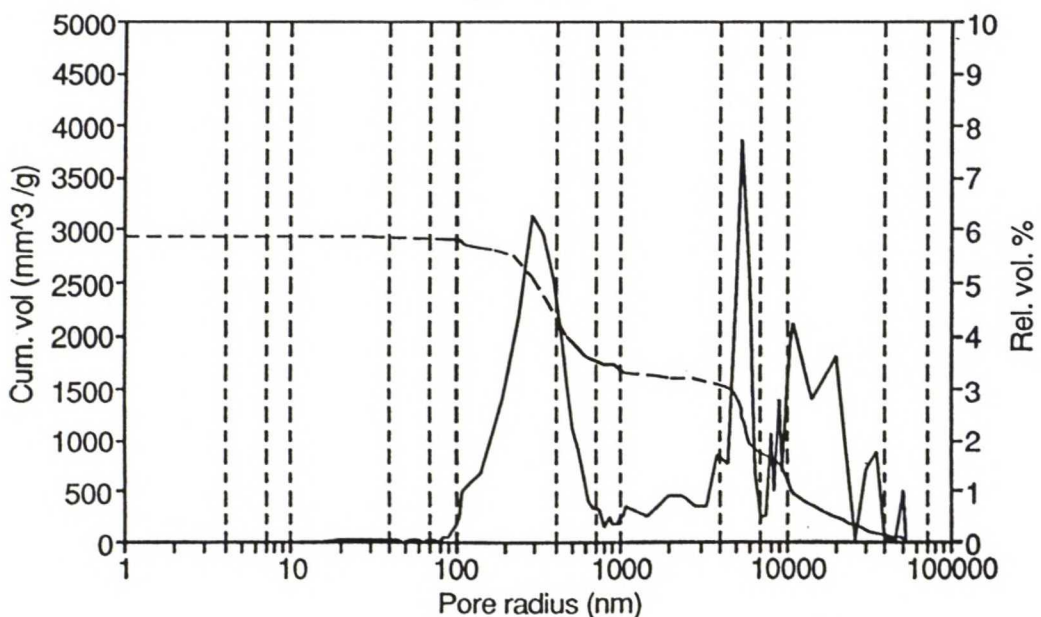
## Elohopeaporosimetriajojen tulokset

Elohopeaporosimetriajojen kuvassa 8 esitettyjen tulosten rinnakkaskoekappaleista esitetään vastaavat huokoskokojakautuma tulokset. Koekappaleet olivat 1,6 mm paksuja kuusiviiluja. SPL2 on kuusen kesäpuuviilu, jonka tiheys on  $690,3 \text{ kg/m}^3$  ja SPE2 on kevätpuuviilu, jonka tiheys on  $259,3 \text{ kg/m}^3$ . Elohopeaporosimetriajot teki Karri Mäkinen TKK.

### SPRUCE, LATEWOOD (SPL2)



### SPRUCE, EARLYWOOD (SPE2)





# Vertailumallin analyttisen ratkaisun suhteellisen painonmuutoksen laskentatulokset

Analyttisellä ratkaisulla laskettiin suhteellisen painonmuutoksen arvot ajanhetkillä 2 s., 80 s. ja 400 s. Ajanhetkillä 80 s. ja 400 s. on lisäksi laskettu kumulatiivinen kosteuskertymä ja ajanhetken kosteusvirrantiheys.

Potentiaali			Ilma		Puu	
	[ ]		FEM	[ ]	Anal.	[ ]
ROO	kg/m3	1500	1.5E-06	kg/mm3	1500	kg/m3
T	K	285				
M.C.max	%	12.81				
M.C.min	%	7.34				
M.C.		0.10075				
dM.C.		0.0547				
R.H.max	%	75				
R.H.min	%	45				
R.H		0.6				
dR.H.		0.3				
kapasiteet		26379.24	1.76E+10		26379.24	
D	m2/s	8.43E-08	0.084294	mm2/s	3.2E-12	m2/s
l	m	4.2E-05	0.042	mm	4.2E-05	m
BEETTA	m/s	0.02007	20.06997	mm/s	7.61E-07	m/s

t	s	0	0.5	1.95	2	2.05	4.5	8	12.5	18
			1	1	1	1	1	1	1	1
		1	0.8088	0.8035	0.8034	0.8032	0.7944	0.7821	0.7665	0.7479
		2	0.0883	0.0833	0.0831	0.0829	0.0752	0.0653	0.0545	0.0437
		3	0.0307	0.0261	0.0259	0.0258	0.0196	0.0133	0.008	0.0043
		4	0.0148	0.0108	0.0107	0.0106	0.0062	0.0029	0.0011	0.0003
		5	0.0084	0.0049	0.0049	0.0048	0.002	0.0006	0.0001	1.5E-0
		6	0.0051	0.0023	0.0023	0.0022	0.0006	8.9E-0	7.8E-0	4E-07
		7	0.0033	0.0011	0.0011	0.001	0.0002	1.1E-0	3.8E-0	6E-09
		8	0.0022	0.0005	0.0005	0.0005	3.9E-0	1.2E-0	1.3E-0	5E-11
		9	0.0015	0.0002	0.0002	0.0002	8.4E-0	9.1E-0	2.7E-1	2.2E-1
		10	0.001	9.7E-0	8.9E-0	8.2E-0	1.6E-0	5.6E-0	3.9E-1	5.5E-1
E		0	0.0361	0.0671	0.068	0.0688	0.1019	0.1358	0.1698	0.2038
sqrt(t)	sqrt(s)	0	0.7071	1.3964	1.4142	1.4318	2.1213	2.8284	3.5355	4.2426

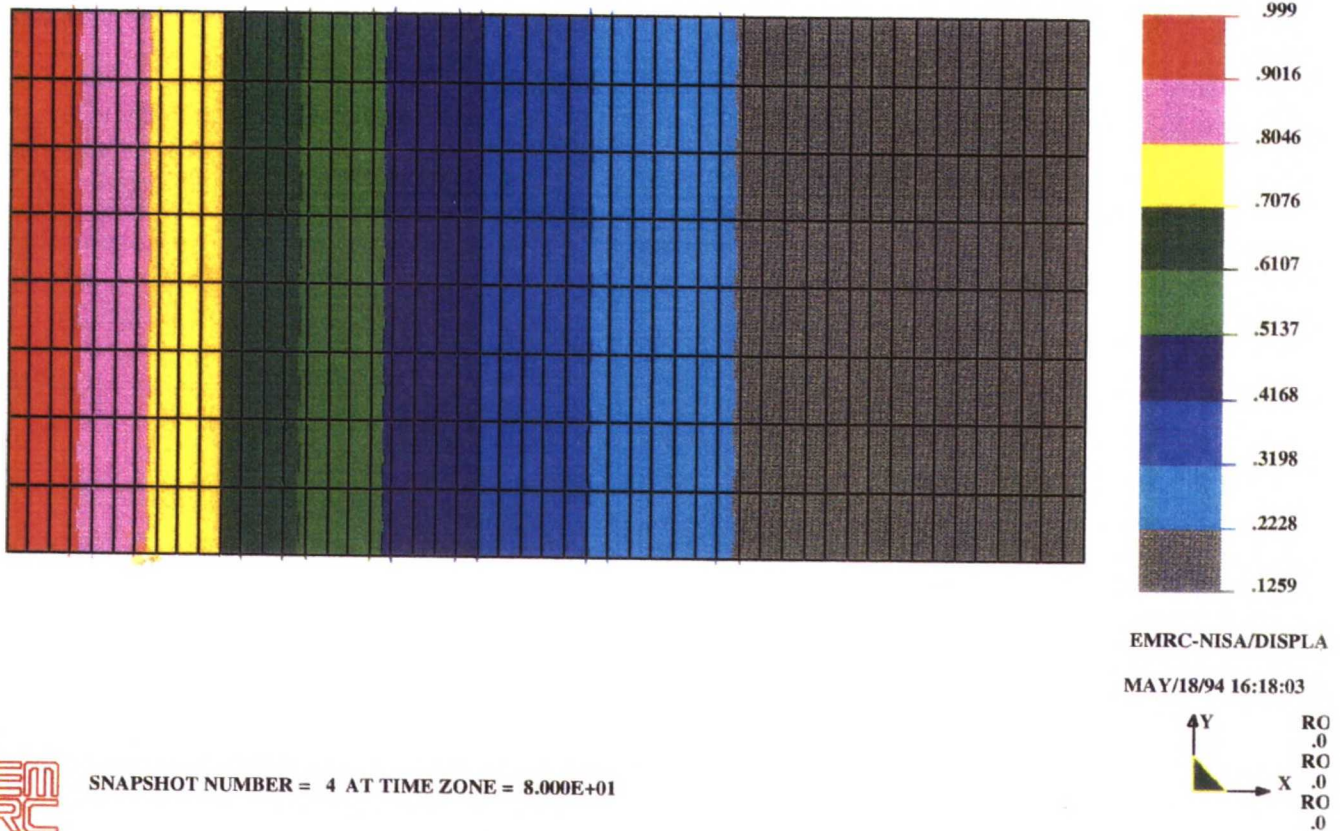
t	s	0	20	79.95	80	80.05	180	320	500
			1	1	1	1	1	1	1
		1	0.7413	0.567	0.5669	0.5668	0.3626	0.1939	0.0867
		2	0.0403	0.0036	0.0036	0.0036	6.5E-0	2.3E-0	1.7E-1
		3	0.0035	4.3E-0	4.3E-0	4.2E-0	6E-11	9.6E-1	1.8E-2
		4	0.0002	4.1E-1	4.1E-1	4E-10	1.3E-1	6E-33	4.6E-5
		5	7.2E-0	2.7E-1	2.6E-1	2.6E-1	5E-31	4.8E-5	2.4E-8
		6	1.3E-0	1.1E-2	1.1E-2	1.1E-2	3.5E-4	4.6E-7	2E-120
		7	1.3E-0	2.8E-2	2.7E-2	2.6E-2	4.3E-6	5E-108	5E-167
		8	6.6E-1	4.3E-3	4.1E-3	3.9E-3	8.7E-8	6E-143	2E-221
		9	1.7E-1	3.9E-4	3.7E-4	3.5E-4	3E-104	9E-183	9E-284
		10	2.2E-1	2.1E-5	2E-59	1.8E-5	2E-129	1E-227	0
E		0	0.2148	0.4294	0.4295	0.4296	0.6374	0.8061	0.9133
sqrt(t)	sqrt(s)	0	4.4721	8.9415	8.9443	8.9471	13.416	17.889	22.361
w	kg/möyk	2.318E-05							
V	m3	8.786E-10							
At	m2	8.786E-10							
Ag	m2	2.092E-05							
Aika	s	80							
dt		0.1							
dE		0.0002679							
M	kg	6.21E-09							
g	kg/m2s	0.0029685							

t	s	0	100	399.95	400	400.05	900	1600	2500
			1	1	1	1	1	1	1
		1	0.5184	0.1357	0.1356	0.1356	0.0145	0.0006	1.1E-0
		2	0.0016	9.3E-0	9.3E-0	9.2E-0	1.7E-1	1E-29	1.9E-4
		3	4.5E-0	1.3E-2	1.3E-2	1.3E-2	6.8E-4	7.3E-8	2E-123
		4	5.1E-1	1.5E-4	1.5E-4	1.5E-4	4.1E-8	1E-154	3E-240
		5	1.9E-1	1.3E-6	1.3E-6	1.3E-6	3E-144	3E-254	0
		6	2.2E-2	7.7E-9	7.5E-9	7.3E-9	3E-214	0	0
		7	7.5E-3	3E-134	3E-134	3E-134	3E-298	0	0
		8	7.6E-4	7E-178	7E-178	7E-178	0	0	0
		9	2.2E-5	1E-227	1E-227	1E-227	0	0	0
		10	1.9E-7	1E-283	1E-283	1E-283	0	0	0
E		0	0.48	0.8643	0.8644	0.8644	0.9855	0.9994	1
sqrt(t)	sqrt(s)	0	10	19.999	20	20.001	30	40	50
w	kg/möyk	2.318E-05							
V	m3	8.786E-10							
At	m2	8.786E-10							
Ag	m2	2.092E-05							
Aika	s	400							
dt		0.1							
dE		6.062E-05							
M	kg	1.405E-09							
g	kg/m2s	0.0006716							



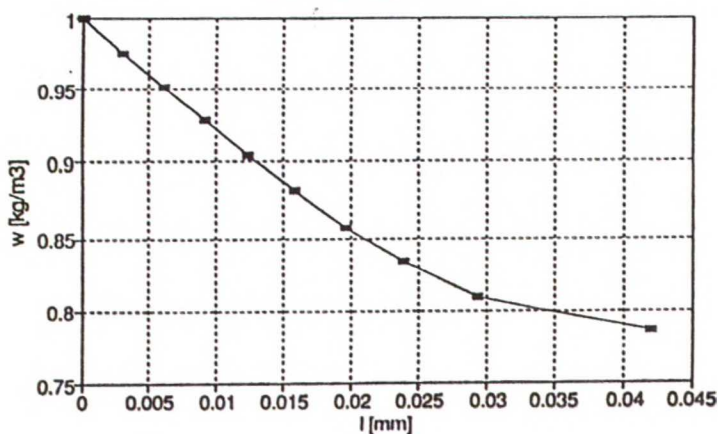
# Vertailumallin NISA:lla lasketut suhteellisen painonmuutoksen arvot

NISAlla laskettiin suhteellisen painonmuutoksen arvot tasa-arvopinta-alakuvaajasta ajanhetkillä 80 s. ja 400 s. Tasa-arvopinta-alakuvaajasta muodostettiin matkan funktiona oleva kosteuspitoisuuskuvaaja. Kuvaajista mitattiin jokaisen kosteispitoisuuden osuus.. Näiden tietojen avulla laskettiin suhteellinen painonmuutos.



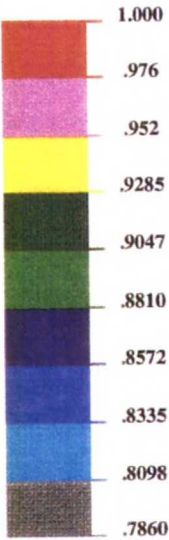
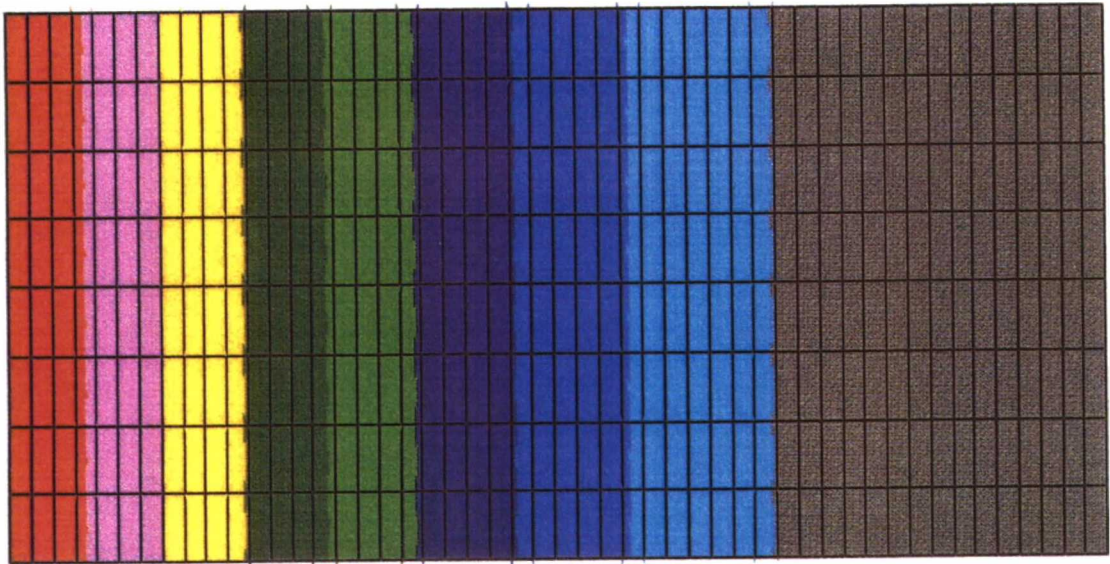
## Kosteuspitoisuus, FEM

Soluseinää, t=80 s



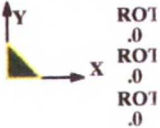
w-pylväs [mm]	X(l) [mm]	Y(w) [kg/m³]	ALA	E %
0	0	0	0	
0	0	0.99	0.001399	
14	0.002827	0.9016	0.00132	
13	0.005452	0.8046	0.001402	
14	0.008279	0.7076	0.001401	
14	0.011106	0.6107	0.001525	
16	0.014337	0.5137	0.001628	
18	0.017971	0.4168	0.001755	
21	0.022212	0.3198	0.001949	
27	0.027663	0.2228	0.002847	
67	0.041192	0.1259	0.002593	
	0.041192	0	0	
204		0	0.432625	43.26252





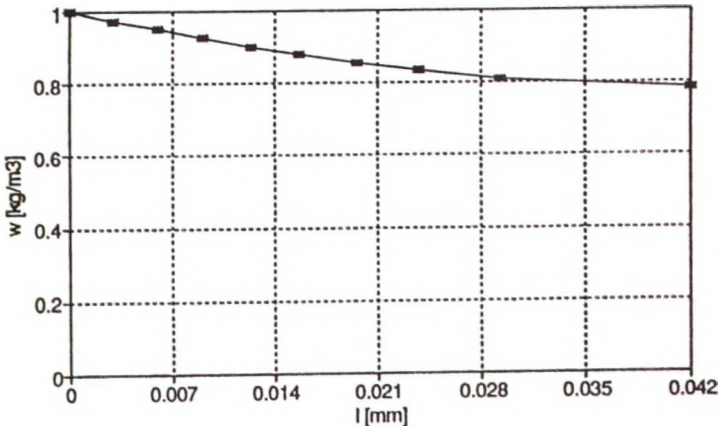
EMRC-NISA/DISPLAY

MAY/19/94 10:50:19



SNAPSHOT NUMBER = 10 AT TIME ZONE = 4.000E+02

FEM, soluseinää  
t=400 s



w-pylväs [mm]	X(l) [mm]	Y(w) [kg/m3]	ALA	E %
0	0	0	0	
0	0	1	0.001514	
15	0.003029	0.976	0.001514	
15	0.006058	0.952	0.001513	
15	0.009087	0.9285	0.001608	
16	0.012317	0.9047	0.001699	
17	0.01575	0.881	0.001877	
19	0.019587	0.8572	0.00205	
21	0.023827	0.8335	0.002554	
27	0.029279	0.8098	0.005499	
63	0.042	0.786	0.016506	
	0.042	0	0	
208		0	0.865122	86.51216

# Vertailumallin NISA:lla lasketut elementtien kosteusvirrat

NISAn elementtikohtaiset kosteusvirrat tarkasteluajanjaksoittain.

$t^{\wedge-2}$ [s $^{\wedge-2}$ ]	t [s]	m [kg/möykk]	g [kg/m2s]	G [kg/s]	E [-]
0	0	0			0
1.414214	2	3.94E-07	0.018853	0.0493	0.017016
2	4	1.07E-06	0.013316	0.034822	0.046052
2.44949	6	1.57E-06	0.010868	0.02842	0.06788
2.828427	8	2E-06	0.00941	0.024608	0.086183
3.162278	10	2.37E-06	0.008416	0.022007	0.102272
3.464102	12	2.71E-06	0.007682	0.020088	0.116802
3.741657	14	3.02E-06	0.007112	0.018597	0.130154
4	16	3.3E-06	0.006652	0.017395	0.142577
4.242641	18	3.57E-06	0.006271	0.016399	0.154241
4.472136	20	3.83E-06	0.005949	0.015557	0.165271
6.324555	40	5.96E-06	0.004207	0.011001	0.25694
7.745967	60	7.55E-06	0.003433	0.008977	0.325895
8.944272	80	8.89E-06	0.002968	0.007762	0.383672
10	100	1.01E-05	0.002639	0.006901	0.434285
10.95445	120	1.11E-05	0.00238	0.006224	0.479588
12.64911	160	1.29E-05	0.001971	0.005153	0.558125
14.14214	200	1.44E-05	0.001645	0.0043	0.623384
15.49193	240	1.57E-05	0.001375	0.003596	0.677892
16.7332	280	1.68E-05	0.00115	0.003008	0.723479
17.88854	320	1.77E-05	0.000962	0.002517	0.761616
18.97367	360	1.84E-05	0.000805	0.002105	0.793522
20	400	1.9E-05	0.000674	0.001762	0.820217

## Efektiivisen huokosaukon laskenta

Efektiivinen huokosaukko laskettiin Liun (1988) mallin mukaisesti.

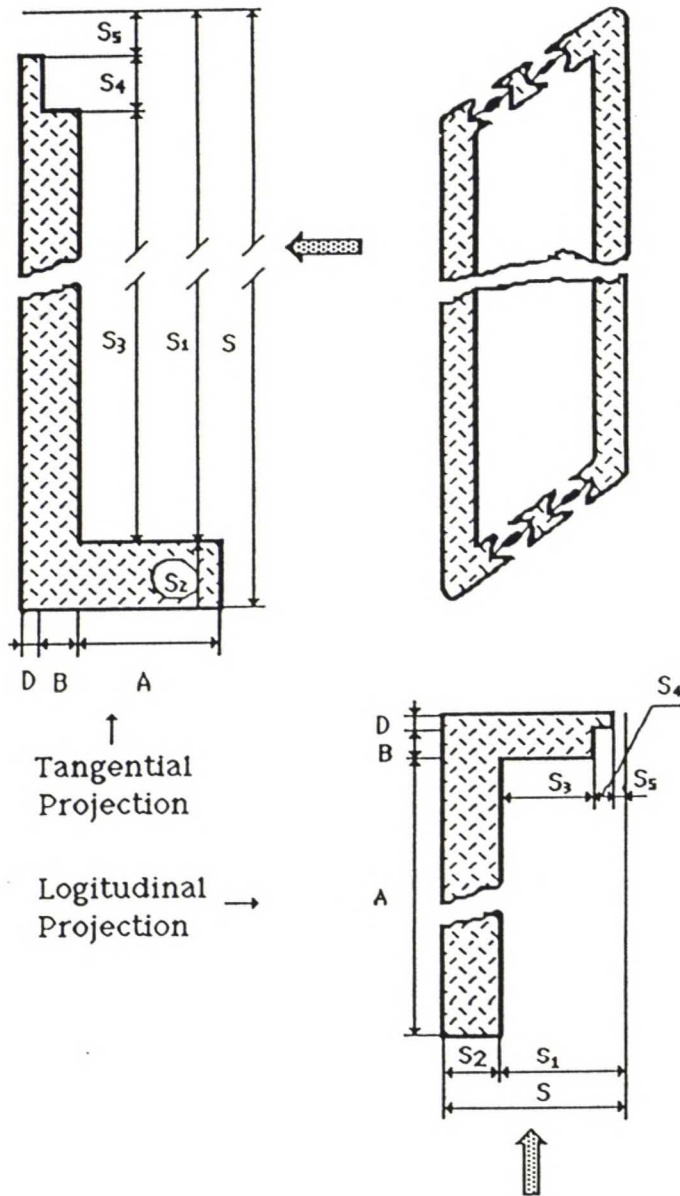


Figure 1

Dimensions of the representative volume-averaged tracheid and its modified projections in the tangential and longitudinal directions. The modification is in that the projected areas of the cell wall, pit chambers and pores in each direction are laid together. The arrows indicate the directions of moisture diffusion.

- S : area of the tracheid across diffusion direction
- $S_1$ : area of lumen across diffusion direction
- $S_2$ : area of cell wall
- $S_3$ : area of lumen minus the areas of pit chambers
- $S_4$ : sum of pit chamber areas minus pit areas
- $S_5$ : sum of margo pore areas

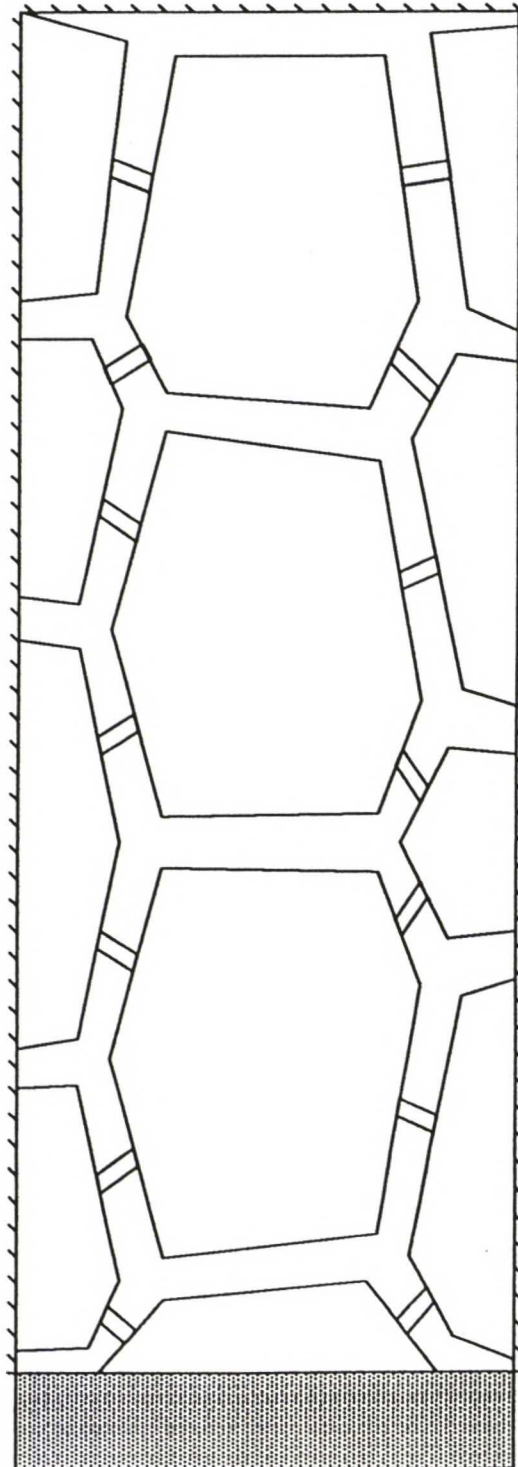
- A : length of the lumen in the diffusion direction
- B : thickness of cell wall minus membrane thickness
- D : thickness of pit membrane



	Kenno	Epäs	Neliö
seinänpaksuus	2.2	2.85	5
huokosaukko	9	14	8.4
torus	3.8	7	3.3
reikä	0.5	0.3	0.5
solunleveys   säde	16.6	46.36	12.5
solunleveys   tang	21.96	21.2	12.5
kalvonpaksuus	0.25	0.21	0.28
huokosia/trakeidi	130	220	50
reikiä/margo	170	400	50
trakeidin pituus	2850	2820	3150
S	10.5	26.03	11.25
S1	8.3	23.18	6.25
S2	2.2	2.85	5
S3	7.57454	20.17766	12.06018
S4	0.596131	2.251753	0.371942
S5	0.380643	0.55145	0.077916
efekt. huok.	0.639386	2.292386	0.376305
A	8.78	7.75	1.25
B	1.95	2.64	4.72
D	0.25	0.21	0.28
S4/S	0.056774	0.086506	0.033062
S5/S	0.036252	0.021185	0.006926
(S4+S5)/S	0.093026	0.107691	0.039987
huokosaukko/trakeidi	0.042161	0.088879	0.017593
reiät/trakeidi	0.022123	0.016325	0.003117
reiät/margo	0.638522	0.244898	0.209486
reiät/huokonen	0.524691	0.183673	0.177154

## Epäsymmetrisen mallin geometria tiedot

Listauksessa on epäsymmetrisen mallin soluonteloiden ja soluseinien kulmasolmujen koordinaatit ja niiden avulla muodostetut soluseinän pituudet sekä soluontelon pinta-ala. Lisäksi on laskettu efektiivisen huokosaukon kulmasolmujen koordinaatit ja tarkistukseksi efektiivisen huokosaukon leveys. Solut on esitetty ala vasemmalta siirtyen oikealle riveittäin. Kuva on mittakaavassa 1:0,001 ja käännettynä niin että päädyssä oleva 13 mm paksu tunnettu osuus on vasemmanlaidan pinnansiirtokerroin.



X	Y	L (seinä)	kulma	A (ontelo)	X(aukko)	Y(aukko)	L(aukko)
1.60E-03	0.00E+00	8.65E-03	1.18E+00	4.900E-04	9.334E-03	1.032E-02	2.29E-03
4.90E-03	8.00E-03	1.23E-02	4.82E-01		1.137E-02	1.138E-02	
1.58E-02	1.37E-02	3.46E-02	1.95E-01		3.163E-02	1.057E-02	2.29E-03
4.97E-02	7.00E-03	7.34E-03	1.27E+00		3.387E-02	1.013E-02	
5.19E-02	0.00E+00	5.03E-02	0.00E+00				
1.60E-03	0.00E+00	1.60E-03	0.00E+00				
5.82E-02	0.00E+00	8.85E-03	1.47E+00	2.943E-04	6.262E-02	1.140E-02	2.29E-03
5.73E-02	8.80E-03	1.41E-02	4.54E-01		6.468E-02	1.240E-02	
7.00E-02	1.50E-02	1.41E-02	4.54E-01		7.532E-02	1.240E-02	2.29E-03
8.27E-02	8.80E-03	8.85E-03	1.47E+00		7.738E-02	1.140E-02	
8.18E-02	0.00E+00	2.36E-02	0.00E+00				
5.82E-02	0.00E+00	5.82E-02	0.00E+00				
8.81E-02	0.00E+00	7.34E-03	1.27E+00	4.724E-04	1.061E-01	1.013E-02	2.29E-03
9.03E-02	7.00E-03	3.46E-02	1.95E-01		1.084E-01	1.057E-02	
1.24E-01	1.37E-02	1.23E-02	4.82E-01		1.286E-01	1.138E-02	2.29E-03
1.35E-01	8.00E-03	8.08E-03	1.43E+00		1.307E-01	1.032E-02	
1.34E-01	0.00E+00	4.59E-02	0.00E+00				
8.81E-02	0.00E+00	8.81E-02	0.00E+00				
1.38E-01	0.00E+00	7.25E-03	1.14E+00	3.341E-04	1.579E-01	8.845E-03	2.29E-03
1.41E-01	6.60E-03	3.55E-02	1.36E-01		1.601E-01	9.155E-03	
1.77E-01	1.14E-02	1.15E-02	1.46E+00				
1.78E-01	0.00E+00	3.95E-02	0.00E+00				
1.38E-01	0.00E+00	1.38E-01	0.00E+00				
0.00E+00	1.00E-02	1.54E-02	6.42E-01	3.888E-04	5.232E-03	1.391E-02	2.29E-03
1.23E-02	1.92E-02	2.64E-02	1.48E+00		7.068E-03	1.529E-02	
9.80E-03	4.55E-02	1.30E-02	7.14E-01		5.766E-03	4.900E-02	2.29E-03
0.00E+00	5.40E-02	4.40E-02	1.57E+00		4.034E-03	5.050E-02	
0.00E+00	1.00E-02	1.00E-02	1.57E+00				
					3.382E-02	1.534E-02	2.29E-03
1.87E-02	1.79E-02	3.30E-02	1.68E-01	1.680E-03	3.608E-02	1.496E-02	
5.12E-02	1.24E-02	1.59E-02	3.54E-01		5.757E-02	1.475E-02	2.29E-03
6.61E-02	1.79E-02	2.80E-02	1.55E+00		5.973E-02	1.555E-02	
6.66E-02	4.59E-02	2.60E-02	2.65E-01		5.516E-02	4.900E-02	2.29E-03
4.15E-02	5.27E-02	2.70E-02	2.67E-01		5.294E-02	4.960E-02	
1.55E-02	4.56E-02	2.79E-02	1.46E+00		2.961E-02	4.945E-02	2.29E-03
1.87E-02	1.79E-02	2.59E-02	7.64E-01		2.739E-02	4.885E-02	



					8.027E-02	1.555E-02	2.29E-03
7.39E-02	1.79E-02	1.59E-02	3.54E-01	1.680E-03	8.243E-02	1.475E-02	
8.88E-02	1.24E-02	3.30E-02	1.68E-01		1.039E-01	1.496E-02	2.29E-03
1.21E-01	1.79E-02	2.79E-02	1.46E+00		1.062E-01	1.534E-02	
1.25E-01	4.56E-02	2.70E-02	2.67E-01		1.126E-01	4.885E-02	2.29E-03
9.85E-02	5.27E-02	2.60E-02	2.65E-01		1.104E-01	4.945E-02	
7.34E-02	4.59E-02	2.80E-02	1.55E+00		8.706E-02	4.960E-02	2.29E-03
7.39E-02	1.79E-02	7.60E-02	2.38E-01		8.484E-02	4.900E-02	
					1.338E-01	1.655E-02	2.29E-03
1.28E-01	1.92E-02	1.57E-02	4.07E-01	1.453E-03	1.360E-01	1.565E-02	
1.42E-01	1.30E-02	3.23E-02	1.37E-01		1.570E-01	1.504E-02	2.29E-03
1.74E-01	1.74E-02	2.71E-02	1.57E+00		1.592E-01	1.536E-02	
1.74E-01	4.45E-02	3.43E-02	1.85E-01		1.584E-01	4.744E-02	2.29E-03
1.40E-01	5.08E-02	1.15E-02	4.79E-01		1.561E-01	4.786E-02	
1.30E-01	4.55E-02	2.64E-02	1.49E+00		1.363E-01	4.868E-02	2.29E-03
1.28E-01	1.92E-02	1.29E-01	1.49E-01		1.343E-01	4.762E-02	
3.00E-03	6.50E-02	9.60E-03	1.54E+00	3.825E-04	6.805E-03	5.382E-02	2.29E-03
3.30E-03	5.54E-02	9.98E-03	4.23E-01		8.895E-03	5.288E-02	
1.24E-02	5.13E-02	2.61E-02	2.20E-01		2.403E-02	5.390E-02	2.29E-03
3.79E-02	5.70E-02	8.01E-03	1.52E+00		2.627E-02	5.440E-02	
3.75E-02	6.50E-02	3.45E-02	0.00E+00				
3.00E-03	6.50E-02	6.51E-02	1.52E+00				
4.29E-02	6.50E-02	8.19E-03	1.42E+00	5.692E-04	5.593E-02	5.443E-02	2.29E-03
4.41E-02	5.69E-02	2.65E-02	2.06E-01		5.817E-02	5.397E-02	
7.00E-02	5.15E-02	2.65E-02	2.06E-01		8.183E-02	5.397E-02	2.29E-03
9.59E-02	5.69E-02	8.19E-03	1.42E+00		8.407E-02	5.443E-02	
9.71E-02	6.50E-02	5.42E-02	0.00E+00				
4.29E-02	6.50E-02	7.79E-02	9.87E-01				
1.03E-01	6.50E-02	8.01E-03	1.52E+00	3.663E-04	1.137E-01	5.440E-02	2.29E-03
1.02E-01	5.70E-02	2.61E-02	2.20E-01		1.160E-01	5.390E-02	
1.28E-01	5.13E-02	9.98E-03	4.23E-01		1.311E-01	5.288E-02	2.29E-03
1.37E-01	5.54E-02	9.60E-03	1.54E+00		1.332E-01	5.382E-02	
1.37E-01	6.50E-02	3.40E-02	0.00E+00				
1.03E-01	6.50E-02	1.22E-01	5.63E-01				
1.42E-01	6.50E-02	1.02E-02	1.49E+00	4.341E-04	1.581E-01	5.298E-02	2.29E-03
1.43E-01	5.48E-02	3.31E-02	1.18E-01		1.604E-01	5.272E-02	
1.76E-01	5.09E-02	1.47E-02	1.27E+00				
1.80E-01	6.50E-02	3.80E-02	0.00E+00				

1.42E-01 6.50E-02 1.56E-01 4.29E-01

0.00E+00 0.00E+00 1.80E-01 0.00E+00 1.170E-02  
 1.80E-01 0.00E+00 6.50E-02 1.57E+00  
 1.80E-01 6.50E-02 1.80E-01 0.00E+00  
 0.00E+00 6.50E-02 6.50E-02 1.57E+00  
 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00

Ontelot 8.544E-03  
 Seinät 3.156E-03  
 Tiheys 4.046E+02

Soluseinän pituus		Soluseinän paksuus	
säde	tang	ss.säde	ss.tang
12.3	8.65	4.7	6
34.6	7.34	6	5.4
14.1	8.85	5.7	5.9
14.1	8.85	5.7	5
34.6	7.34	6	6.1
12.3	8.08	5.9	7.3
35.5	7.25	5.8	6
15.4	11.5	6.3	6.2
33	9.6	7.6	4
15.9	8.01	5.3	4
33	8.19	6	6.3
15.7	8.19	6	6.3
32.3	8.01	5.3	3.2
13	9.6	5.6	5.515385
27	10.2	5.85	2.757692
26	14.7	2.925	
26	13.2		
27	13.2		
11.5	13.95		
34.3	13.95		
9.98	14		
26.1	14		
26.5	14		
26.5	14		
26.1	13.95		
9.98	13.95		
33.1	13.2		
23.18	13.2		
	13.55		
	13.55		
	11.202		

## Laskenta-ajojen kosteusvirrat

Laskentatuloksena saaduista elemettikohtaisista kosteusvirroista muodostettiin kosteusvirrantiheys ja kosteuskertymä sekä suhteellinen painonmuutos. Ajotuloksiin ei ole listattu jokaisen aikavälin elemettikohtaista kosteusvirtaa joista muodostettiin kosteusvirrantiheys. Elementtikohtaiset kosteusvirrat on taulukkolaskentatiedostoina. Ajolistassa on jokaisen ajon nimi ja vastaavuus malliin. Ajotiedostoista on tallennettu tulotustiedostot (\*26.dat ja \*39.dat) sekä jokaisesta mallista yksi ajotiedosto (\*.nis). Kaikki ajotiedostojen laskentahistoria tiedostot (\*.out) on tuhottu, lukuunottamatta niistä siirrettyjä elementtikohtaisia kosteusvirtoja. Tiedostoja on tallessa DAT-nauhalla noin 450 Mb. Kaikkien käytettyjen tiedostojen yhteenlaskettu koko on 2 - 3 Gb. Mallin nimen jälkeen tuleva luku (3, 4, 6 tai 14) ilmaisee solujen lukumäärän mallissa ja kirjaimen A jälkeinen luku efektiivisen huokosaukon leveyden nanometreinä.

max. aika      tarkasteluväli      tunniste

### VERTAILUMALLI

seina	100	20	$\beta=0,02$ m/s
seina1	100	20	$\beta=2$ m/s
seina2	20	2	
seina3	400	40	
ssn6a1	stationaarinen nelio6a750 mallilla, jossa KAIKKI elem. soluseinää		

### NELIÖ3A0

nelio3s1	0,1	0,005	
nelio3s2	1,0	0,1	
nelio3s3	40	2,0	
nelio3s4	100	5,0	
nelio3s5	200	10,0	
nelio3ss	stationaarinen		$\beta = 2,0$ m/s
nelio3ss1	stationaarinen		$\beta = 2010$ m/s



	max. aika	tarkasteluväli	tunniste
NELIÖ3A750			
nelio3a1	0,1	0,005	
nelio3a2	1,0	0,1	
nelio3a3	40,	2,0	
nelio3as	stationaarinen		$\beta = 2,0 \text{ m/s}$
nelio3as1	stationaarinen		$\beta = 2010 \text{ m/s}$

NELIÖ6A0		
nelio6s1	0,1	0,005
nelio6s2	1,0	0,1
nelio6s3	40	2,0
nelio6s4	200	10,0
nelio6s5	400	20,0
nelio6ss	stationaarinen	

NELIÖ6A750		
nelio6a1	0,1	0,005
nelio6a2	1,0	0,1
nelio6a3	60	2,0
nelio6ss	stationaarinen	
nelio5as	stationaarinen	$\beta = 20 \text{ m/s}$
nelio6as	stationaarinen	$\beta = 2010 \text{ m/s}$

#### KENNO

huoko.nis	alkuperäinen, huokosaukon solmut yhdistetty soluseinään
huoko5c.nis	alkuperäinen, huokosaukon sivujen solmuja ei ole yhdistetty

#### KENNO4A0

huoko10c	80	8,0
huoko11c	20	2,0
huoko12c	2	0,2
huoko14c	0,2	0,01
huoko15c	10	0,5
huoko16c	40	4,0
kenno4s0	stationaarinen	

	max. aika	tarkasteluväli	tunniste
kenno4s01	stationaarinen		$\beta = 2010 \text{ m/s}$
KENNOA18,75			
huoko21c	0,2	0,01	$D_{c,eff} = 0.8273 \text{ mm}^2/\text{s}$
huoko22c	2,0	0,2	$D_{c,eff} = 0.8273 \text{ mm}^2/\text{s}$
huoko23c	10	1,0	$D_{c,eff} = 0.8273 \text{ mm}^2/\text{s}$
huoko24c	40	2,0	$D_{c,eff} = 0.8273 \text{ mm}^2/\text{s}$
kenno4s18	stationaarinen		
kenno4s181	stationaarinen		$\beta = 2010 \text{ m/s}$
KENNO4A320			
huoko31c	0,1	0,005	$D_{c,eff} = 12,75 \text{ mm}^2/\text{s}$
huoko32c	2,0	0,1	$D_{c,eff} = 12,75 \text{ mm}^2/\text{s}$
huoko33c	20	2,0	$D_{c,eff} = 12,75 \text{ mm}^2/\text{s}$
kenno4s320	stationaarinen		
kenno4s3201	stationaarinen		$\beta = 2010 \text{ m/s}$
huoko41c	0,1	0,005	$L_a = 320 \text{ nm}, 2 \text{ elem.}$
huoko42c	2	0,1	$L_a = 320 \text{ nm}, 2 \text{ elem.}$
huoko43c	20	1	$L_a = 320 \text{ nm}, 2 \text{ elem.}$
huoko44c	0,01	0,0005	$L_a = 320 \text{ nm}, 2 \text{ elem.}$
huoko51c	20	1,0	$L_a = 320 \text{ nm}, 3 \text{ elem.}$
huoko53c	1	0,2	$L_a = 320 \text{ nm}, 3 \text{ elem.}$
KENNO4 A640			
huoko551c	20	2,0	
huoko552c	2	0,2	
huoko553c	0,2	0,02	
huoko554c	0,1	0,005	
kenno4s640	stationaarinen		
kenno4s6401	stationaarinen		$\beta = 2010 \text{ m/s}$
KENNO14A0			
huoko50	120	12,0	
huoko51	80	6,0	
huoko52	20	2,0	

	max. aika	tarkasteluväli	tunniste
huoko53	2	0,1	
huoko54	0,1	0,005	
kenno14s0	stationaarinen		
kenno14s01	stationaarinen		$\beta = 2010 \text{ m/s}$
KENNO14A320			
kesa1571	0,1	0,005	$D_{c,eff} = 12,75 \text{ mm}^2/\text{s}$
kesa1572	2	0,1	$D_{c,eff} = 12,75 \text{ mm}^2/\text{s}$
kesa1573	20	2,0	$D_{c,eff} = 12,75 \text{ mm}^2/\text{s}$
kesa1574	80	6,0	$D_{c,eff} = 12,75 \text{ mm}^2/\text{s}$
kenno14s320	stationaarinen		
kenno14s3201	stationaarinen		$\beta = 2010 \text{ m/s}$
KENNO14A640			
kesa1471	0,1	0,005	
kesa1472	2,0	0,1	
kesa1473	20	2,0	
kesa1474	80	6,0	
kenno14s640	stationaarinen		
kenno14s6401	stationaarinen		$\beta = 2010 \text{ m/s}$
huoko551	80	6,0	huok.auk. solmut yhd.
huoko552	20	2,0	huok.auk. solmut yhd.
huoko553	2	0,1	huok.auk. solmut yhd.
huoko554	0,1	0,005	huok.auk. solmut yhd.
EPÄSYMMETRINEN			
epa1	0,1	0,005	
epa2	20	0,1	
epass	stationaarinen		
epss	stationaarinen aukoton		
LIIMA 9,5 g/m <sup>2</sup>			
liima11	0,1	0,005	
liima12	2,0	0,1	
liima13	20	2,0	



	max. aika	tarkasteluväli	tunniste
liima14	85	4 - 10	
liima1	stationaarinen		
liima1ss	stationaarinen		$\beta = 2010 \text{ m/s}$
LIIMA 55 g/m <sup>2</sup>			
liima21	0,1	0,005	
liima22	2,0	0,1	
liima23	20	2,0	
liima24	100	4 - 15	
liima2	stationaarinen		
liima2ss	stationaarinen		$\beta = 2010 \text{ m/s}$

## Nelio3a0

t	t <sup>-2</sup>	E	m	g
s	s		kg/möy	kg/m2s
0	0	0	0	0
0.005	0.070711	0.000361	2.7E-09	0.086557
0.01	0.1	0.001057	7.93E-09	0.080658
0.02	0.141421	0.002316	1.74E-08	0.070349
0.03	0.173205	0.003428	2.57E-08	0.063103
0.05	0.223607	0.005368	4.03E-08	0.053298
0.07	0.264575	0.007037	5.28E-08	0.046854
0.1	0.316228	0.009215	6.91E-08	0.040282
0.2	0.447214	0.015	1.13E-07	0.029132
0.3	0.547723	0.019415	1.46E-07	0.023848
0.5	0.707107	0.026471	1.99E-07	0.018488
0.7	0.83666	0.032176	2.41E-07	0.015743
1	1	0.039404	2.96E-07	0.013167
2	1.414214	0.058306	4.37E-07	0.009516
4	2	0.08623	6.47E-07	0.007239
8	2.828427	0.129244	9.69E-07	0.005666
12	3.464102	0.164112	1.23E-06	0.004795
18	4.242641	0.207805	1.56E-06	0.003944
26	5.09902	0.255715	1.92E-06	0.003243
40	6.324555	0.323439	2.43E-06	0.002562
55	7.416198	0.382464	2.87E-06	0.00216
70	8.3666	0.433197	3.25E-06	0.001899
85	9.219544	0.478273	3.59E-06	0.001707
100	10	0.519034	3.89E-06	0.001554
120	10.95445	0.567995	4.26E-06	0.001384
140	11.83216	0.611721	4.59E-06	0.00124
160	12.64911	0.650935	4.88E-06	0.001113
180	13.41641	0.686166	5.15E-06	0.001001
200	14.14214	0.717847	5.38E-06	0.0009
220	14.8324	0.746345	5.6E-06	0.00081
380	19.49359	0.900722	6.76E-06	0.000348
400	20	0.911742	6.84E-06	0.000313

## Nelio3a750

t	t <sup>-2</sup>	E	m	g
s	s		kg/möy	kg/m2s
0	0	0	0	0
0.005	0.070711	0.001038	7.79E-09	0.124601
0.01	0.1	0.002048	1.54E-08	0.121197
0.02	0.141421	0.003917	2.94E-08	0.112134
0.03	0.173205	0.005625	4.22E-08	0.10249
0.05	0.223607	0.008735	6.55E-08	0.093288
0.07	0.264575	0.011551	8.66E-08	0.084467
0.1	0.316228	0.015413	1.16E-07	0.077246
0.2	0.447214	0.026637	2E-07	0.067346
0.3	0.547723	0.036284	2.72E-07	0.057882
0.5	0.707107	0.053415	4.01E-07	0.051392
0.7	0.83666	0.068684	5.15E-07	0.045806
1	1	0.089351	6.7E-07	0.041335
2	1.414214	0.147933	1.11E-06	0.035149
4	2	0.240737	1.81E-06	0.027841
8	2.828427	0.381865	2.86E-06	0.021169
12	3.464102	0.490242	3.68E-06	0.016257
18	4.242641	0.617551	4.63E-06	0.012731
26	5.09902	0.737482	5.53E-06	0.008995
40	6.324555	0.864225	6.48E-06	0.005432

Nelio6a0

t	t <sup>-2</sup>	E	m	g
s	s		kg/möy	kg/m2s
0	0	0	0	0
0.005	0.070711	0.000361	5.41E-09	0.086557
0.01	0.1	0.000709	1.06E-08	0.083607
0.02	0.141421	0.001338	2.01E-08	0.075504
0.03	0.173205	0.001894	2.84E-08	0.066726
0.05	0.223607	0.002864	4.3E-08	0.0582
0.07	0.264575	0.003699	5.55E-08	0.050076
0.1	0.316228	0.004788	7.18E-08	0.043568
0.2	0.447214	0.00768	1.15E-07	0.034707
0.3	0.547723	0.009888	1.48E-07	0.02649
0.5	0.707107	0.013416	2.01E-07	0.021168
0.7	0.83666	0.016268	2.44E-07	0.017115
1	1	0.019882	2.98E-07	0.014455
2	1.414214	0.029333	4.4E-07	0.011341
4	2	0.043295	6.49E-07	0.008377
8	2.828427	0.064802	9.72E-07	0.006452
12	3.464102	0.082236	1.23E-06	0.00523
18	4.242641	0.104083	1.56E-06	0.004369
26	5.09902	0.128038	1.92E-06	0.003593
40	6.324555	0.161901	2.43E-06	0.002903
50	7.071068	0.182051	2.73E-06	0.002418
60	7.745967	0.200127	3E-06	0.002169
70	8.3666	0.216669	3.25E-06	0.001985
80	8.944272	0.232019	3.48E-06	0.001842
90	9.486833	0.246405	3.7E-06	0.001726
100	10	0.259988	3.9E-06	0.00163
110	10.48809	0.27289	4.09E-06	0.001548
120	10.95445	0.285206	4.28E-06	0.001478
130	11.40175	0.297009	4.46E-06	0.001416
140	11.83216	0.308359	4.63E-06	0.001362
150	12.24745	0.319303	4.79E-06	0.001313
160	12.64911	0.329884	4.95E-06	0.00127
170	13.0384	0.340134	5.1E-06	0.00123
180	13.41641	0.350082	5.25E-06	0.001194
190	13.78405	0.359755	5.4E-06	0.001161
200	14.14214	0.369172	5.54E-06	0.00113
280	16.7332	0.437654	6.56E-06	0.001027
320	17.88854	0.467887	7.02E-06	0.000907
360	18.97367	0.496138	7.44E-06	0.000848
440	20.97618	0.547749	8.22E-06	0.000774
480	21.9089	0.571356	8.57E-06	0.000708
520	22.80351	0.59368	8.91E-06	0.00067
600	24.4949	0.634863	9.52E-06	0.000618
640	25.29822	0.653833	9.81E-06	0.000569
680	26.07681	0.671814	1.01E-05	0.000539
720	26.83282	0.688857	1.03E-05	0.000511
760	27.5681	0.705017	1.06E-05	0.000485
800	28.28427	0.720341	1.08E-05	0.00046

Nelio6a750

t	t <sup>-2</sup>	E	m	g
s	s		kg/möy	kg/m2s
0	0	0	0	0
0.005	0.070711	0.000519	7.79E-09	0.124601
0.01	0.1	0.001024	1.54E-08	0.121197
0.02	0.141421	0.001959	2.94E-08	0.112134
0.03	0.173205	0.002813	4.22E-08	0.10249
0.05	0.223607	0.004366	6.55E-08	0.093192
0.07	0.264575	0.005772	8.66E-08	0.084372
0.1	0.316228	0.007703	1.16E-07	0.077247
0.2	0.447214	0.013314	2E-07	0.067334
0.3	0.547723	0.018138	2.72E-07	0.057878
0.5	0.707107	0.026681	4E-07	0.05126
0.7	0.83666	0.034297	5.14E-07	0.045699
1	1	0.044654	6.7E-07	0.041427
2	1.414214	0.074132	1.11E-06	0.035374
4	2	0.121413	1.82E-06	0.028368
8	2.828427	0.195679	2.94E-06	0.02228
12	3.464102	0.256824	3.85E-06	0.018343
18	4.242641	0.336235	5.04E-06	0.015882
26	5.09902	0.423987	6.36E-06	0.013163
34	5.830952	0.497623	7.46E-06	0.011045
36	6	0.514237	7.71E-06	0.009968
40	6.324555	0.545668	8.19E-06	0.009429
52	7.211103	0.627708	9.42E-06	0.008204
60	7.745967	0.673389	1.01E-05	0.006852



t	t <sup>-2</sup>	E	m	g
s	s		kg/möy	kg/m2s
0	0	0	0	0
0.01	0.1	0.007678	6.27E-08	0.299853
0.02	0.141421	0.014364	1.17E-07	0.261126
0.03	0.173205	0.019564	1.6E-07	0.203081
0.04	0.2	0.023966	1.96E-07	0.171915
0.05	0.223607	0.027339	2.23E-07	0.151817
0.06	0.244949	0.031003	2.53E-07	0.137411
0.07	0.264575	0.034241	2.8E-07	0.12644
0.08	0.282843	0.037256	3.04E-07	0.117727
0.09	0.3	0.040087	3.28E-07	0.11059
0.1	0.316228	0.042766	3.49E-07	0.104605
0.11	0.331662	0.045327	3.7E-07	0.100027
0.12	0.34641	0.047778	3.9E-07	0.095735
0.13	0.360555	0.050116	4.09E-07	0.091306
0.14	0.374166	0.052362	4.28E-07	0.087706
0.15	0.387298	0.054529	4.46E-07	0.084612
0.16	0.4	0.056624	4.63E-07	0.081821
0.17	0.412311	0.058654	4.79E-07	0.079287
0.18	0.424264	0.060625	4.95E-07	0.076972
0.19	0.43589	0.062542	5.11E-07	0.074847
0.2	0.447214	0.064408	5.26E-07	0.072888
0.4	0.632456	0.095865	7.83E-07	0.061426
0.6	0.774597	0.119641	9.77E-07	0.046427
0.8	0.894427	0.139784	1.14E-06	0.039333
1	1	0.157664	1.29E-06	0.034914
1.2	1.095445	0.173922	1.42E-06	0.031746
1.4	1.183216	0.188928	1.54E-06	0.029301
1.6	1.264911	0.202926	1.66E-06	0.027334
1.8	1.341641	0.216092	1.77E-06	0.025708
2	1.414214	0.228555	1.87E-06	0.024337
2.5	1.581139	0.257383	2.1E-06	0.022516
3	1.732051	0.283494	2.32E-06	0.020395
3.5	1.870829	0.30746	2.51E-06	0.018719
4	2	0.329743	2.69E-06	0.017405
5	2.236068	0.370533	3.03E-06	0.01593
6	2.44949	0.407272	3.33E-06	0.014348
7	2.645751	0.440907	3.6E-06	0.013136
8	2.828427	0.472037	3.86E-06	0.012157
9	3	0.501061	4.09E-06	0.011335
10	3.162278	0.528282	4.32E-06	0.010631
12	3.464102	0.578608	4.73E-06	0.009827
14	3.741657	0.623426	5.09E-06	0.008751
16	4	0.662994	5.42E-06	0.007727
18	4.242641	0.698421	5.71E-06	0.006918
20	4.472136	0.730166	5.97E-06	0.006199
24	4.898979	0.784296	6.41E-06	0.005285
28	5.291503	0.827809	6.76E-06	0.004248
32	5.656854	0.862793	7.05E-06	0.003416
36	6	0.89092	7.28E-06	0.002746
40	6.324555	0.913536	7.46E-06	0.002208
48	6.928203	0.946726	7.73E-06	0.00162
56	7.483315	0.968182	7.91E-06	0.001047
64	8	0.982053	8.02E-06	0.000677
72	8.485281	0.991019	8.1E-06	0.000438
80	8.944272	0.996816	8.14E-06	0.000283

## Kenno4a18.75

t	t <sup>-2</sup>	E	m	g
s	s		kg/möy	kg/m2s
0	0	0	0	0
0.01	0.1	0.007603	6.21E-08	0.296925
0.02	0.141421	0.014231	1.16E-07	0.258837
0.03	0.173205	0.019407	1.59E-07	0.20216
0.04	0.2	0.023813	1.95E-07	0.172049
0.05	0.223607	0.027218	2.22E-07	0.152515
0.06	0.244949	0.030907	2.53E-07	0.138525
0.07	0.264575	0.034181	2.79E-07	0.127874
0.08	0.282843	0.037239	3.04E-07	0.119404
0.09	0.3	0.040119	3.28E-07	0.112476
0.1	0.316228	0.04285	3.5E-07	0.106678
0.11	0.331662	0.045455	3.71E-07	0.10171
0.12	0.34641	0.047949	3.92E-07	0.097398
0.13	0.360555	0.050345	4.11E-07	0.093601
0.14	0.374166	0.052659	4.3E-07	0.090377
0.15	0.387298	0.054897	4.49E-07	0.087368
0.16	0.4	0.057062	4.66E-07	0.08455
0.17	0.412311	0.059163	4.83E-07	0.082072
0.18	0.424264	0.061205	5E-07	0.079755
0.19	0.43589	0.063194	5.16E-07	0.077665
0.2	0.447214	0.065135	5.32E-07	0.075821
0.4	0.632456	0.098163	8.02E-07	0.064491
0.6	0.774597	0.123445	1.01E-06	0.049368
0.8	0.894427	0.144937	1.18E-06	0.041967
1	1	0.164019	1.34E-06	0.037261
1.2	1.095445	0.181351	1.48E-06	0.033845
1.4	1.183216	0.197332	1.61E-06	0.031204
1.6	1.264911	0.212214	1.73E-06	0.029061
1.8	1.341641	0.22618	1.85E-06	0.027271
2	1.414214	0.239379	1.96E-06	0.025773
3	1.732051	0.297611	2.43E-06	0.022742
4	2	0.346268	2.83E-06	0.019002
5	2.236068	0.388932	3.18E-06	0.016662
6	2.44949	0.427296	3.49E-06	0.014982
7	2.645751	0.462297	3.78E-06	0.013669
8	2.828427	0.494571	4.04E-06	0.012604
9	3	0.524515	4.29E-06	0.011694
10	3.162278	0.552403	4.51E-06	0.010891
12	3.464102	0.602862	4.93E-06	0.009853
14	3.741657	0.647054	5.29E-06	0.008629
16	4	0.685837	5.6E-06	0.007573
18	4.242641	0.719919	5.88E-06	0.006655
20	4.472136	0.749883	6.13E-06	0.005851
22	4.690416	0.776209	6.34E-06	0.005141
24	4.898979	0.799352	6.53E-06	0.004519



## Kenno4a320

t	t <sup>-2</sup>	E	m	g
s	s		kg/möy	kg/m2s
0	0	0	0	0
0.005	0.070711	0.005367	4.38E-08	0.419176
0.01	0.1	0.010194	8.33E-08	0.377049
0.015	0.122474	0.014199	1.16E-07	0.312781
0.02	0.141421	0.017739	1.45E-07	0.276534
0.025	0.158114	0.020967	1.71E-07	0.252115
0.03	0.173205	0.023965	1.96E-07	0.234196
0.035	0.187083	0.026785	2.19E-07	0.220283
0.04	0.2	0.02946	2.41E-07	0.208922
0.045	0.212132	0.032016	2.62E-07	0.199635
0.05	0.223607	0.034471	2.82E-07	0.191754
0.06	0.244949	0.039136	3.2E-07	0.182171
0.07	0.264575	0.043532	3.56E-07	0.171691
0.08	0.282843	0.04771	3.9E-07	0.163168
0.09	0.3	0.051704	4.22E-07	0.155966
0.1	0.316228	0.055544	4.54E-07	0.149976
0.2	0.447214	0.089122	7.28E-07	0.131135
0.3	0.547723	0.116507	9.52E-07	0.106945
0.4	0.632456	0.140468	1.15E-06	0.093579
0.5	0.707107	0.162117	1.32E-06	0.084546
0.6	0.774597	0.18205	1.49E-06	0.077846
0.7	0.83666	0.200632	1.64E-06	0.072568
0.8	0.894427	0.218103	1.78E-06	0.068232
0.9	0.948683	0.234634	1.92E-06	0.064558
1	1	0.250349	2.05E-06	0.061374
1.2	1.095445	0.279742	2.29E-06	0.057394
1.4	1.183216	0.306822	2.51E-06	0.052879
1.6	1.264911	0.331991	2.71E-06	0.049146
1.8	1.341641	0.355541	2.9E-06	0.045986
2	1.414214	0.377771	3.09E-06	0.043407
3	1.732051	0.474489	3.88E-06	0.037772
4	2	0.551693	4.51E-06	0.030151
5	2.236068	0.615842	5.03E-06	0.025053
6	2.44949	0.670443	5.48E-06	0.021324
7	2.645751	0.716853	5.86E-06	0.018125
8	2.828427	0.756417	6.18E-06	0.015451
9	3	0.79019	6.46E-06	0.01319
10	3.162278	0.819037	6.69E-06	0.011266
11	3.316625	0.843682	6.89E-06	0.009625
12	3.464102	0.86474	7.06E-06	0.008224
13	3.605551	0.882751	7.21E-06	0.007034
14	3.741657	0.898145	7.34E-06	0.006012
15	3.872983	0.911287	7.45E-06	0.005132
16	4	0.922518	7.54E-06	0.004386
17	4.123106	0.932116	7.62E-06	0.003748
18	4.242641	0.940318	7.68E-06	0.003203
19	4.358899	0.947327	7.74E-06	0.002737
20	4.472136	0.953317	7.79E-06	0.002339

## Kenno4a640

t	t <sup>-2</sup>		m	g
s	s		kg/möy	kg/m2s
0	0	0	0	0
0.005	0.070711	0.005765	4.71E-08	0.450312
0.01	0.1	0.010956	8.95E-08	0.405451
0.015	0.122474	0.015284	1.25E-07	0.338016
0.02	0.141421	0.019138	1.56E-07	0.301073
0.025	0.158114	0.022731	1.86E-07	0.290853
0.04	0.2	0.032281	2.64E-07	0.256638
0.06	0.244949	0.043209	3.53E-07	0.213387
0.08	0.282843	0.053013	4.33E-07	0.191433
0.1	0.316228	0.062048	5.07E-07	0.176427
0.12	0.34641	0.070518	5.76E-07	0.165385
0.14	0.374166	0.078542	6.42E-07	0.156682
0.16	0.4	0.086198	7.04E-07	0.149511
0.18	0.424264	0.093543	7.64E-07	0.143421
0.2	0.447214	0.100617	8.22E-07	0.138136
0.4	0.632456	0.162412	1.33E-06	0.120665
0.6	0.774597	0.212566	1.74E-06	0.097934
0.8	0.894427	0.256147	2.09E-06	0.0851
1	1	0.29393	2.4E-06	0.073779
1.2	1.095445	0.328189	2.68E-06	0.066896
1.4	1.183216	0.360802	2.95E-06	0.063684
1.6	1.264911	0.391004	3.19E-06	0.058974
1.8	1.341641	0.419141	3.42E-06	0.054942
2	1.414214	0.445394	3.64E-06	0.051264
4	2	0.647137	5.29E-06	0.039394
6	2.44949	0.769395	6.29E-06	0.023873
8	2.828427	0.846452	6.92E-06	0.015047
10	3.162278	0.895399	7.32E-06	0.009558
12	3.464102	0.926535	7.57E-06	0.00608
14	3.741657	0.946347	7.73E-06	0.003869
16	4	0.958954	7.83E-06	0.002462
18	4.242641	0.966976	7.9E-06	0.001566
20	4.472136	0.972081	7.94E-06	0.000997



Kenno14a0

t	t <sup>-2</sup>	E	m	g
s	s		kg/möy	kg/m2s
0	0	0	0	0
0.005	0.070711	0.001426	4.08E-08	0.389961
0.01	0.1	0.002686	7.68E-08	0.344532
0.02	0.141421	0.00459	1.31E-07	0.260291
0.03	0.173205	0.006071	1.74E-07	0.202479
0.04	0.2	0.007102	2.03E-07	0.171672
0.05	0.223607	0.00829	2.37E-07	0.151638
0.06	0.244949	0.009294	2.66E-07	0.137273
0.1	0.316228	0.012701	3.63E-07	0.116466
0.2	0.447214	0.019073	5.45E-07	0.087106
0.3	0.547723	0.023872	6.83E-07	0.065602
0.4	0.632456	0.027886	7.98E-07	0.054881
0.5	0.707107	0.031424	8.99E-07	0.048364
0.7	0.83666	0.037629	1.08E-06	0.042418
1	1	0.045551	1.3E-06	0.036101
1.4	1.183216	0.054527	1.56E-06	0.030676
2	1.414214	0.065925	1.89E-06	0.025971
4	2	0.095554	2.73E-06	0.020253
6	2.44949	0.117846	3.37E-06	0.015238
8	2.828427	0.136501	3.9E-06	0.012752
10	3.162278	0.152909	4.37E-06	0.011215
12	3.464102	0.167715	4.8E-06	0.010121
14	3.741657	0.181281	5.18E-06	0.009273
16	4	0.193897	5.55E-06	0.008624
18	4.242641	0.20574	5.88E-06	0.008095
20	4.472136	0.216936	6.2E-06	0.007653
24	4.898979	0.237783	6.8E-06	0.007125
30	5.477226	0.266045	7.61E-06	0.00644
36	6	0.291562	8.34E-06	0.005814
42	6.480741	0.315009	9.01E-06	0.005342
48	6.928203	0.336821	9.63E-06	0.00497
54	7.348469	0.357299	1.02E-05	0.004666
60	7.745967	0.37666	1.08E-05	0.004411
72	8.485281	0.412699	1.18E-05	0.004106
78	8.831761	0.429544	1.23E-05	0.003838
108	10.3923	0.505768	1.45E-05	0.003474
120	10.95445	0.532796	1.52E-05	0.003079

Kenno14a320

t	t <sup>-2</sup>	E	m	g
s	s		kg/möy	kg/m2s
0	0	0	0	0
0.005	0.070711	0.00159	4.55E-08	0.434721
0.01	0.1	0.002993	8.56E-08	0.383595
0.015	0.122474	0.004129	1.18E-07	0.310662
0.02	0.141421	0.005134	1.47E-07	0.27468
0.025	0.158114	0.006047	1.73E-07	0.249826
0.03	0.173205	0.006896	1.97E-07	0.232023
0.035	0.187083	0.007696	2.2E-07	0.218781
0.04	0.2	0.008456	2.42E-07	0.207646
0.045	0.212132	0.009181	2.63E-07	0.198412
0.05	0.223607	0.009878	2.83E-07	0.190593
0.06	0.244949	0.011203	3.2E-07	0.1811
0.09	0.3	0.014792	4.23E-07	0.163552
0.1	0.316228	0.015883	4.54E-07	0.149146
0.2	0.447214	0.025424	7.27E-07	0.130437
0.3	0.547723	0.033205	9.5E-07	0.106381
0.4	0.632456	0.040012	1.14E-06	0.093051
0.5	0.707107	0.04616	1.32E-06	0.084048
0.6	0.774597	0.05182	1.48E-06	0.077379
0.7	0.83666	0.057096	1.63E-06	0.072135
0.8	0.894427	0.062058	1.77E-06	0.067835
0.9	0.948683	0.066754	1.91E-06	0.064199
1	1	0.07122	2.04E-06	0.061057
1.2	1.095445	0.079745	2.28E-06	0.058273
1.4	1.183216	0.087911	2.51E-06	0.055821
1.6	1.264911	0.095379	2.73E-06	0.051049
1.8	1.341641	0.102112	2.92E-06	0.046021
2	1.414214	0.108467	3.1E-06	0.043437
4	2	0.160811	4.6E-06	0.035781
6	2.44949	0.199621	5.71E-06	0.026528
8	2.828427	0.231959	6.63E-06	0.022105
10	3.162278	0.260301	7.44E-06	0.019373
12	3.464102	0.285888	8.18E-06	0.01749
14	3.741657	0.309374	8.85E-06	0.016054
16	4	0.331166	9.47E-06	0.014896
18	4.242641	0.35161	1.01E-05	0.013975
20	4.472136	0.370927	1.06E-05	0.013204
24	4.898979	0.40685	1.16E-05	0.012278
30	5.477226	0.455359	1.3E-05	0.011053
36	6	0.498781	1.43E-05	0.009894
42	6.480741	0.538117	1.54E-05	0.008963
48	6.928203	0.573977	1.64E-05	0.008171
66	8.124038	0.664898	1.9E-05	0.006906
72	8.485281	0.69019	1.97E-05	0.005763
78	8.831761	0.713466	2.04E-05	0.005303

## Kenno14a640

t	t <sup>-2</sup>	E	m	g
s	s		kg/möy	kg/m2s
0	0	0	0	0
0.005	0.070711	0.001668	4.77E-08	0.456067
0.01	0.1	0.003154	9.02E-08	0.406184
0.015	0.122474	0.004379	1.25E-07	0.334961
0.02	0.141421	0.005475	1.57E-07	0.299653
0.025	0.158114	0.006483	1.85E-07	0.275674
0.03	0.173205	0.007426	2.12E-07	0.257989
0.04	0.2	0.009175	2.62E-07	0.239105
0.05	0.223607	0.010785	3.08E-07	0.220008
0.06	0.244949	0.012292	3.52E-07	0.206108
0.09	0.3	0.016418	4.7E-07	0.188021
0.1	0.316228	0.017685	5.06E-07	0.173205
0.2	0.447214	0.028884	8.26E-07	0.153104
0.4	0.632456	0.045153	1.29E-06	0.111208
0.6	0.774597	0.058113	1.66E-06	0.088589
0.8	0.894427	0.070622	2.02E-06	0.085504
1	1	0.081856	2.34E-06	0.076794
1.2	1.095445	0.09212	2.63E-06	0.070154
1.5	1.224745	0.106119	3.03E-06	0.063795
1.7	1.30384	0.114692	3.28E-06	0.058607
2	1.414214	0.126653	3.62E-06	0.054503
4	2	0.191271	5.47E-06	0.044171
6	2.44949	0.239139	6.84E-06	0.03272
8	2.828427	0.278986	7.98E-06	0.027238
10	3.162278	0.313883	8.98E-06	0.023854
12	3.464102	0.345318	9.88E-06	0.021488
14	3.741657	0.374145	1.07E-05	0.019705
16	4	0.400904	1.15E-05	0.018291
18	4.242641	0.425957	1.22E-05	0.017125
20	4.472136	0.44956	1.29E-05	0.016134
24	4.898979	0.493168	1.41E-05	0.014904
30	5.477226	0.551125	1.58E-05	0.013206
36	6	0.601656	1.72E-05	0.011514
42	6.480741	0.645961	1.85E-05	0.010095
48	6.928203	0.684891	1.96E-05	0.00887
54	7.348469	0.719128	2.06E-05	0.007801
78	8.831761	0.821638	2.35E-05	0.005839

## Kenno14a640y

t	t <sup>-2</sup>	E	m	g
s	s		kg/möy	kg/m2s
0	0	0	0	0
0.005	0.070711	0.001689	4.83E-08	0.461858
0.01	0.1	0.003221	9.21E-08	0.418966
0.02	0.141421	0.005702	1.63E-07	0.339119
0.03	0.173205	0.007776	2.22E-07	0.283595
0.04	0.2	0.009628	2.75E-07	0.253179
0.05	0.223607	0.011332	3.24E-07	0.232882
0.06	0.244949	0.012926	3.7E-07	0.21796
0.07	0.264575	0.014435	4.13E-07	0.206321
0.1	0.316228	0.018607	5.32E-07	0.190112
0.2	0.447214	0.030358	8.68E-07	0.160648
0.3	0.547723	0.040011	1.14E-06	0.13197
0.4	0.632456	0.048432	1.39E-06	0.115121
0.6	0.774597	0.063062	1.8E-06	0.100006
0.8	0.894427	0.075642	2.16E-06	0.08599
1	1	0.08686	2.48E-06	0.07668
1.4	1.183216	0.106537	3.05E-06	0.067254
2	1.414214	0.131359	3.76E-06	0.056556
4	2	0.195293	5.59E-06	0.043702
6	2.44949	0.242899	6.95E-06	0.032541
8	2.828427	0.282613	8.08E-06	0.027146
10	3.162278	0.317443	9.08E-06	0.023809
12	3.464102	0.348839	9.98E-06	0.021461
14	3.741657	0.377624	1.08E-05	0.019676
16	4	0.404353	1.16E-05	0.018271
18	4.242641	0.429387	1.23E-05	0.017112
20	4.472136	0.452977	1.3E-05	0.016125
24	4.898979	0.496503	1.42E-05	0.014876
30	5.477226	0.554359	1.59E-05	0.013183
36	6	0.604901	1.73E-05	0.011516
42	6.480741	0.649212	1.86E-05	0.010096
48	6.928203	0.688143	1.97E-05	0.00887
54	7.348469	0.722373	2.07E-05	0.007799
78	8.831761	0.824852	2.36E-05	0.005837



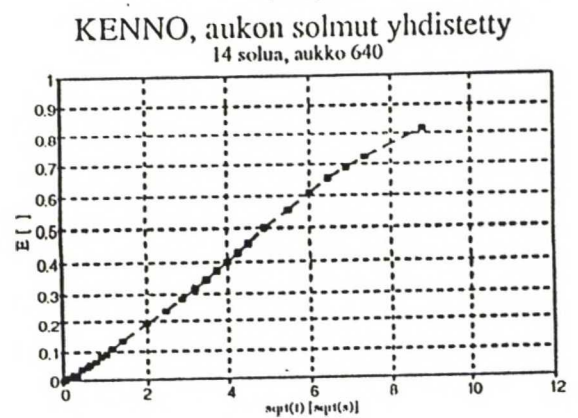
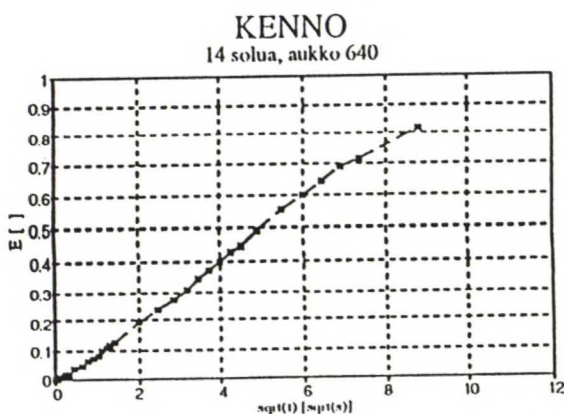
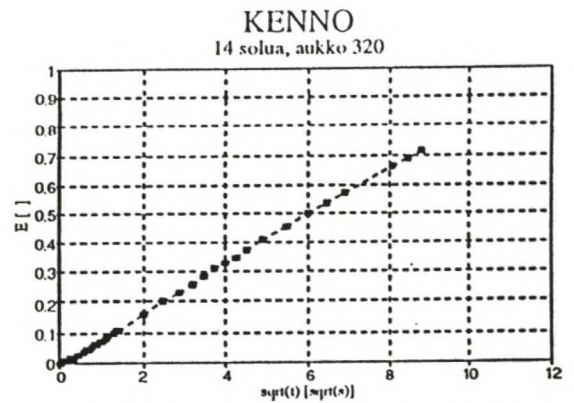
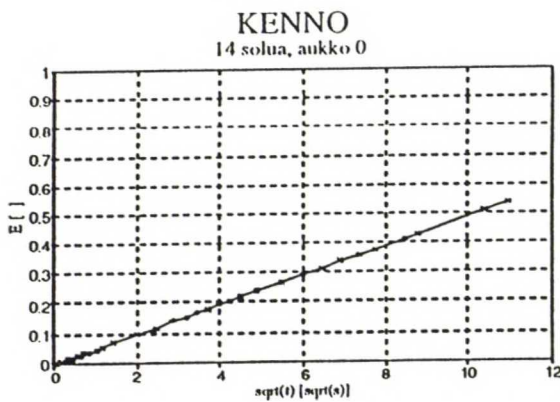
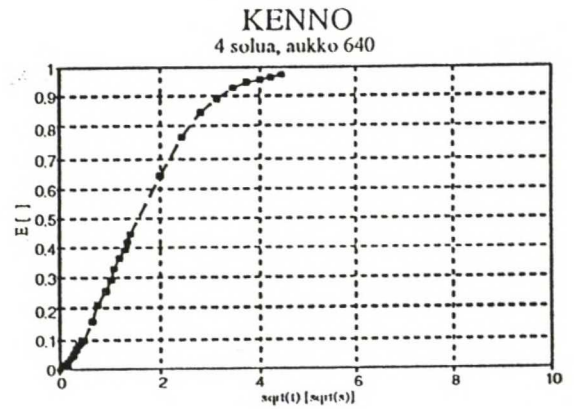
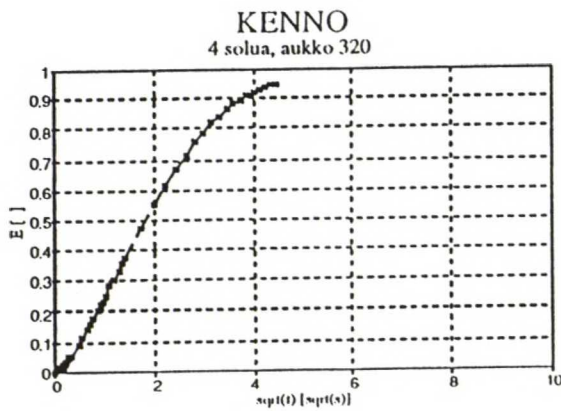
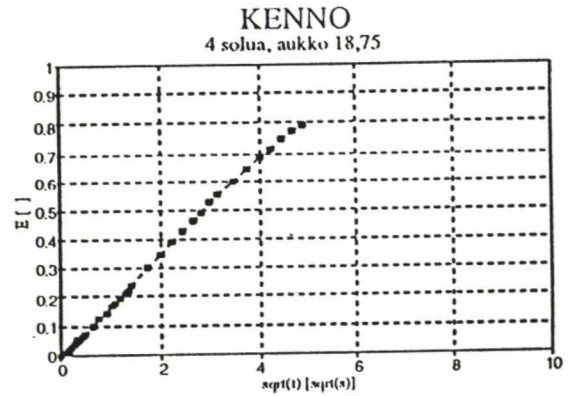
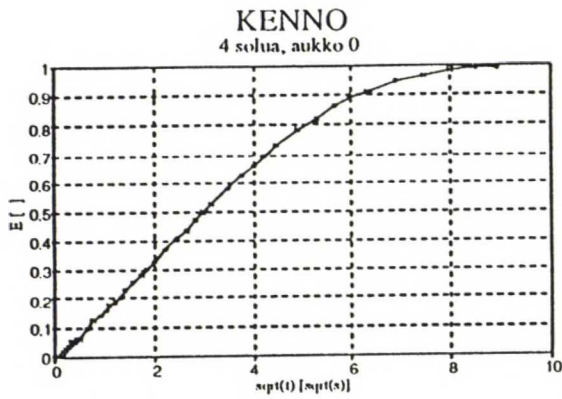
Epäsymmetrinen		E	m	g	Hetk. D	0,5 D
t	t <sup>-2</sup>					
s	s	-	kg/möy	kg/m2s	m2/s	m2/s
0	0	0	0	0		
0.005	0.070711	0.001744	1.45E-07	0.447126	1.55E-11	
0.01	0.1	0.003249	2.71E-07	0.385844	6.72E-11	
0.02	0.141421	0.005573	4.64E-07	0.298014	8.01E-11	
0.03	0.173205	0.007596	6.33E-07	0.259281	1.03E-10	
0.05	0.223607	0.011132	9.28E-07	0.226666	1.25E-10	
0.07	0.264575	0.014305	1.19E-06	0.203391	1.53E-10	
0.1	0.316228	0.018788	1.57E-06	0.191597	1.92E-10	
0.2	0.447214	0.031816	2.65E-06	0.167018	2.52E-10	
0.3	0.547723	0.042964	3.58E-06	0.142932	3.13E-10	
0.5	0.707107	0.062398	5.2E-06	0.124572	3.78E-10	
0.7	0.83666	0.079335	6.61E-06	0.108567	4.35E-10	
1	1	0.10188	8.49E-06	0.096346	4.85E-10	
2	1.414214	0.163715	1.36E-05	0.079274	5.67E-10	
3	1.732051	0.212382	1.77E-05	0.062392	5.97E-10	
6	2.44949	0.325641	2.71E-05	0.048401	6.34E-10	
9	3	0.409903	3.42E-05	0.036009	5.96E-10	
12	3.464102	0.477991	3.98E-05	0.029097	5.48E-10	4.84E-10
16	4	0.553366	4.61E-05	0.024158	5.03E-10	
20	4.472136	0.615793	5.13E-05	0.020008	4.45E-10	

Liima 1					Hetkel	0.5
t	t <sup>-2</sup>	E	m	g	D	D
s	s <sup>-2</sup>		kg/möy	kg/m2s	m2/s	m2/s
0	0	0	0		5.2E-12	
0.005	0.070711	0.001243	4.77E-08	0.456067	2.4E-11	
0.01	0.1	0.00235	9.02E-08	0.406184	2.8E-11	
0.015	0.122474	0.003263	1.25E-07	0.334961	3.2E-11	
0.02	0.141421	0.00408	1.57E-07	0.299653	3.4E-11	
0.025	0.158114	0.004832	1.85E-07	0.275674	3.7E-11	
0.03	0.173205	0.005535	2.12E-07	0.257989	3.9E-11	
0.035	0.187083	0.006201	2.38E-07	0.24419	4.1E-11	
0.04	0.2	0.006836	2.62E-07	0.233122	4.4E-11	
0.05	0.223607	0.008036	3.08E-07	0.220151	4.7E-11	
0.06	0.244949	0.00916	3.51E-07	0.206108	5.2E-11	
0.085	0.291548	0.011744	4.51E-07	0.189626	5.7E-11	
0.1	0.316228	0.013173	5.05E-07	0.174724	6.9E-11	
0.2	0.447214	0.021515	8.26E-07	0.153016	7.3E-11	
0.4	0.632456	0.033641	1.29E-06	0.111207	7.8E-11	
0.6	0.774597	0.0433	1.66E-06	0.088589	1E-10	
0.8	0.894427	0.052622	2.02E-06	0.085495	1.1E-10	
1	1	0.060994	2.34E-06	0.076785	1.1E-10	
1.2	1.095445	0.068643	2.63E-06	0.070154	1.1E-10	
1.5	1.224745	0.079077	3.03E-06	0.063794	1.1E-10	
1.7	1.30384	0.085467	3.28E-06	0.058607	1.1E-10	
2	1.414214	0.094381	3.62E-06	0.054502	1.1E-10	
4	2	0.142517	5.47E-06	0.044147	1.1E-10	
6	2.44949	0.178168	6.84E-06	0.032697	1E-10	
8	2.828427	0.207776	7.97E-06	0.027154	1E-10	
10	3.162278	0.233542	8.96E-06	0.023631	9.9E-11	
12	3.464102	0.256614	9.85E-06	0.02116	9.7E-11	
14	3.741657	0.277647	1.07E-05	0.019291	9.6E-11	
16	4	0.29708	1.14E-05	0.017822	9.5E-11	
18	4.242641	0.315222	1.21E-05	0.016639	9.4E-11	
20	4.472136	0.332297	1.28E-05	0.01566	9.4E-11	
24	4.898979	0.363991	1.4E-05	0.014534	9.3E-11	
28	5.291503	0.393078	1.51E-05	0.013338	9.3E-11	
32	5.656854	0.420148	1.61E-05	0.012413	9.3E-11	
38	6.164414	0.457811	1.76E-05	0.011514	9.3E-11	
44	6.63325	0.492553	1.89E-05	0.010621	9.2E-11	9.4E-11
50	7.071068	0.524842	2.01E-05	0.009871	9E-11	
58	7.615773	0.564592	2.17E-05	0.009114	8.7E-11	
66	8.124038	0.600969	2.31E-05	0.008341	8.2E-11	
75	8.660254	0.638296	2.45E-05	0.007608	7.6E-11	
85	9.219544	0.675757	2.59E-05	0.006871		

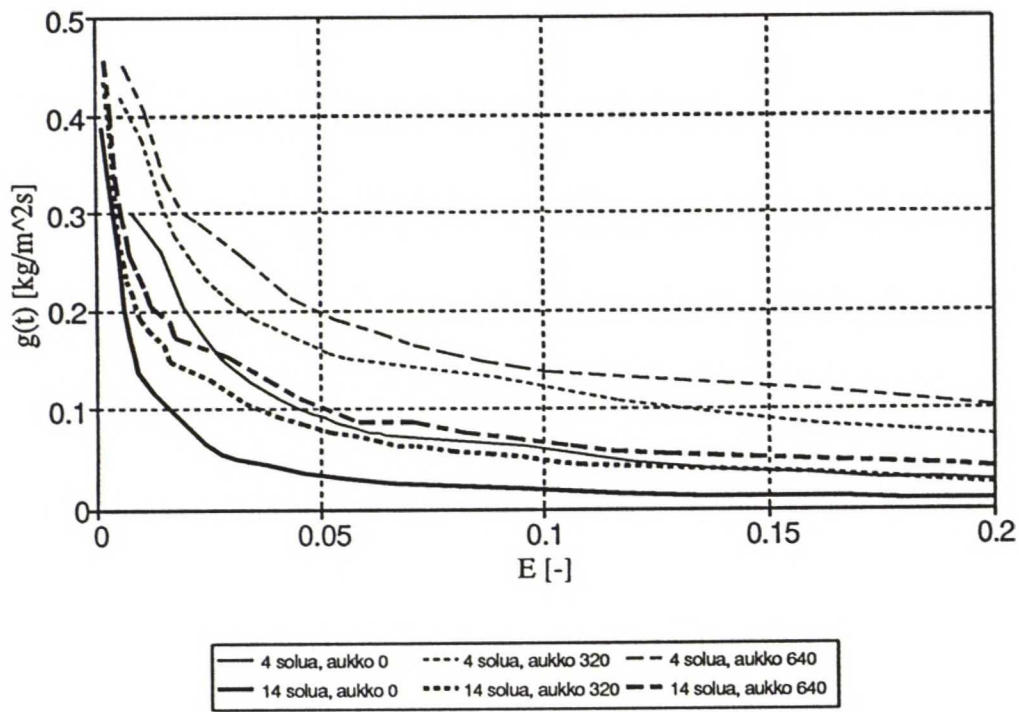
Liima 2					Hetkel	0.5
t	t <sup>-2</sup>	E	m	g	D	D
s	s <sup>-2</sup>		kg/möy	kg/m2s	m2/s	m2/s
0	0	0	0	0	9E-13	
0.005	0.070711	0.000515	4.77E-08	0.456067	4.2E-12	
0.01	0.1	0.000973	9.02E-08	0.406184	4.8E-12	
0.015	0.122474	0.001351	1.25E-07	0.334961	5.4E-12	
0.02	0.141421	0.001689	1.57E-07	0.299653	5.9E-12	
0.025	0.158114	0.002	1.85E-07	0.275674	6.3E-12	
0.03	0.173205	0.002292	2.12E-07	0.257989	6.7E-12	
0.035	0.187083	0.002567	2.38E-07	0.24419	7E-12	
0.04	0.2	0.00283	2.62E-07	0.233122	7.5E-12	
0.05	0.223607	0.003327	3.08E-07	0.220151	8.1E-12	
0.06	0.244949	0.003792	3.51E-07	0.206108	8.9E-12	
0.085	0.291548	0.004862	4.51E-07	0.189626	9.8E-12	
0.1	0.316228	0.005454	5.05E-07	0.174724	1.2E-11	
0.2	0.447214	0.008908	8.26E-07	0.153015	2E-11	
1.1	1.048809	0.0298	2.76E-06	0.102845	1.9E-11	
1.2	1.095445	0.031347	2.91E-06	0.068561	1.9E-11	
1.5	1.224745	0.035663	3.31E-06	0.063729	1.9E-11	
2	1.414214	0.042002	3.89E-06	0.056168	1.9E-11	
4	2	0.061763	5.72E-06	0.043775	1.8E-11	
10	3.162278	0.09981	9.25E-06	0.028094	1.5E-11	
12	3.464102	0.108694	1.01E-05	0.019681	1.4E-11	
14	3.741657	0.116791	1.08E-05	0.017937	1.4E-11	
16	4	0.124305	1.15E-05	0.016644	1.4E-11	
18	4.242641	0.131368	1.22E-05	0.015647	1.4E-11	
20	4.472136	0.138072	1.28E-05	0.014849	1.5E-11	
24	4.898979	0.15066	1.4E-05	0.013943	1.5E-11	
28	5.291503	0.162379	1.5E-05	0.01298	1.6E-11	
32	5.656854	0.173429	1.61E-05	0.012239	1.6E-11	
38	6.164414	0.189037	1.75E-05	0.011525	1.7E-11	
44	6.63325	0.203704	1.89E-05	0.01083	1.7E-11	
50	7.071068	0.217613	2.02E-05	0.010271	1.8E-11	
58	7.615773	0.235199	2.18E-05	0.009739	1.8E-11	
66	8.124038	0.251861	2.33E-05	0.009228	1.9E-11	
75	8.660254	0.269686	2.5E-05	0.008775	1.9E-11	
85	9.219544	0.288525	2.67E-05	0.008346	2E-11	
100	10	0.315175	2.92E-05	0.007871	2E-11	
115	10.72381	0.340224	3.15E-05	0.007399	2.1E-11	
130	11.40175	0.363965	3.37E-05	0.007012	2.1E-11	
145	12.04159	0.386556	3.58E-05	0.006673	2.1E-11	
160	12.64911	0.408137	3.78E-05	0.006374	2.2E-11	
175	13.22876	0.428814	3.97E-05	0.006107	2.2E-11	
190	13.78405	0.448668	4.16E-05	0.005864	2.2E-11	
205	14.31782	0.467764	4.34E-05	0.00564	2.2E-11	
220	14.8324	0.486154	4.51E-05	0.005431	2.1E-11	1.8E-11
265	16.27882	0.537539	4.98E-05	0.005059	2.1E-11	
280	16.7332	0.55347	5.13E-05	0.004705	2.1E-11	
295	17.17556	0.568855	5.27E-05	0.004544	2E-11	
310	17.60682	0.583717	5.41E-05	0.004389	2E-11	
325	18.02776	0.598075	5.54E-05	0.004241		



# Kennomallin suhteellisen painonmuutoksen ja kosteusvirran tiheyden kuvaajat



# KENNO



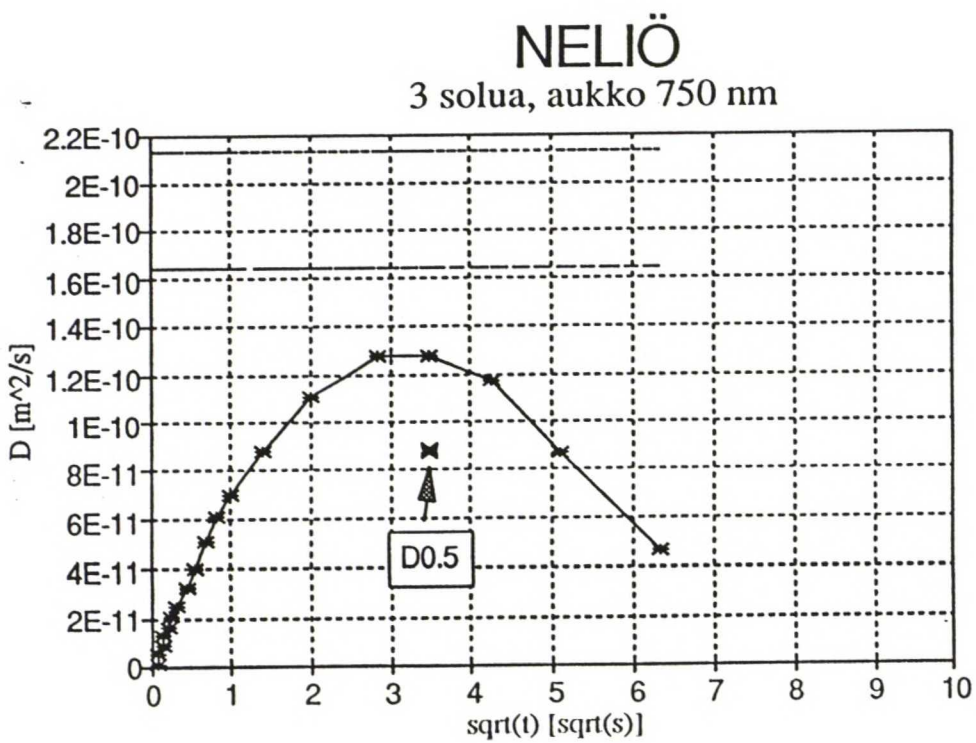
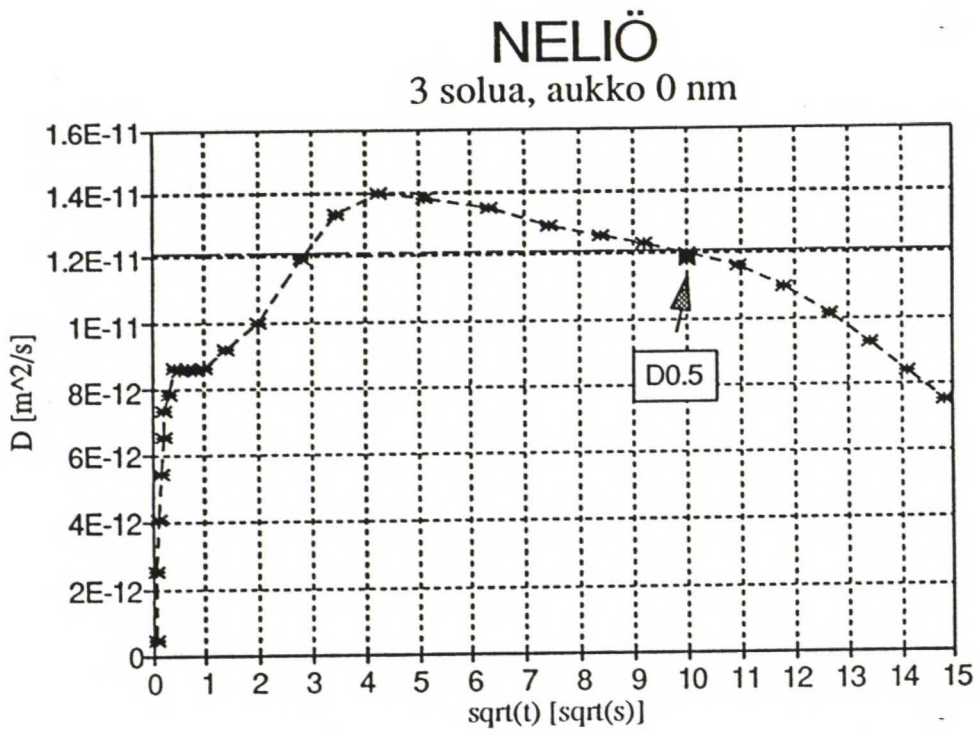
Stationaarisen laskennan diffuusiokertoimet

Diffuusiokertoimia laskettiin eri pinnansiirtokertoimien arvoilla.

Beetta	D	D	g	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
m/s	m^2/s	m^2/s	kg/m2s	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m	kg/m
Soluseinä	2.01	3.47E-12	4.34E-08	0.000289	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	2.7E-05	2.7E-05	2.7E-05	2.7E-05	2.7E-05	2.7E-05	2.7E-05	2.7E-05	2.7E-05	2.7E-05
nelio3a0	2.01	1.21E-11	9.68E-08	0.001291	0.0045	0.0044	0.0039	0.0034											
nelio3a0	2010	1.21E-11	9.69E-08	0.001292	0.0045	0.0044	0.0039	0.0034											
nelio3a750	2.01	1.64E-10	1.31E-06	0.017525	0.009	0.0088	0.008	0.0069	0.0466	0.0466	0.0466	0.0466	0.0466	0.0466	0.0466	0.0466	0.0466	0.0466	0.0466
nelio3a750	2010	2.13E-10	1.7E-06	0.022681	0.004	0.004	0.0037	0.0032	0.0672	0.0672	0.0672	0.0672	0.0672	0.0672	0.0672	0.0672	0.0672	0.0672	0.0672
nelio6a0	2.01	1.2E-11	9.61E-08	0.000641	0.0022	0.0022	0.002	0.0016											
nelio6a750	2.01	1.86E-10	1.49E-06	0.009935	0.0051	0.005	0.0045	0.0039	0.0269	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263	0.0263
nelio6a750	20.1	2.09E-10	1.67E-06	0.011152	0.0024	0.0022	0.0019	0.0016	0.0327	0.0327	0.0327	0.0327	0.0327	0.0327	0.0327	0.0327	0.0327	0.0327	0.0327
nelio6a750	2010	2.13E-10	1.7E-06	0.011342	0.002	0.002	0.0018	0.0016	0.0336	0.0336	0.0336	0.0336	0.0336	0.0336	0.0336	0.0336	0.0336	0.0336	0.0336
kenno4a0	2.01	4.01E-11	3.7E-07	0.008807	0.0253	0.0267	0.0272	0.0273	0.0235	0.0233	0.0233	0.0197	0.0113						
kenno4a0	2010	4.02E-11	3.72E-07	0.008848	0.0231	0.0281	0.0289	0.0289	0.0236	0.0234	0.0195	0.0095							
kenno4a18	2.01	4.57E-11	4.22E-07	0.01004	0.0315	0.0332	0.0334	0.0333	0.0235	0.0233	0.0198	0.0119							
kenno4a18	2010	4.59E-11	4.24E-07	0.010094	0.0294	0.0367	0.0353	0.0337	0.0236	0.0234	0.0195	0.0096							
kenno4a320	2.01	1.23E-10	1.13E-06	0.027001	0.1152	0.1215	0.1178	0.114	0.0242	0.0242	0.0215	0.0264							
kenno4a320	2010	1.24E-10	1.14E-06	0.027236	0.1163	0.1551	0.1225	0.0996	0.0233	0.023	0.0194	0.0106							
kenno4a640	2.01	1.81E-10	1.67E-06	0.039877	0.1812	0.1912	0.1844	0.1777	0.0249	0.0248	0.0229	0.0271							
kenno4a640	2010	1.87E-10	1.73E-06	0.041162	0.1871	0.2512	0.1933	0.153	0.023	0.0228	0.0193	0.0114							
kenno14a0	2.01	4.02E-11	3.71E-07	0.002525	0.0073	0.0077	0.0078	0.0078	0.0067	0.0067	0.0056	0.0032							
kenno14a0	2010	4.03E-11	3.72E-07	0.002531	0.0067	0.008	0.0083	0.0082	0.0067	0.0067	0.0056	0.0027							
kenno14a320	2.01	1.23E-10	1.14E-06	0.007738	0.0334	0.0352	0.0341	0.033	0.007	0.007	0.0062	0.0059							
kenno14a320	2010	1.24E-10	1.14E-06	0.007782	0.0332	0.0443	0.035	0.0284	0.0067	0.0066	0.0055	0.003							
kenno14a640	2.01	1.85E-10	1.71E-06	0.011641	0.0527	0.0559	0.0539	0.0519	0.0073	0.0073	0.0067	0.0079							
kenno14a640	2010	1.87E-10	1.73E-06	0.011761	0.0534	0.0718	0.0552	0.0437	0.0066	0.0065	0.0055	0.0032							
epass	20.1	9.06E-11	6.45E-07	0.003584	0.0106	0.0131	0.0136	0.0186	0.0119	0.0075	0.0311	0.0317	0.0317	0.0317	0.0317	0.0317	0.0317	0.0317	0.0317
epasa	2.01	2.22E-10	1.58E-06	0.008802	0.01	0.0059	0.0054	0.0071	0.0052	0.0077	0.0015	0.1256	0.1051	0.1271	0.1715				
liima1a640	2.01	1.19E-10	1.1E-06	0.007462	0.0339	0.0358	0.0345	0.0333	0.0047	0.0046	0.0043	0.0051							
liima1a640	2010	1.2E-10	1.1E-06	0.007506	0.0341	0.0458	0.0352	0.0279	0.0042	0.0042	0.0035	0.0021							
liima2a640	2.01	5.57E-11	5.14E-07	0.003497	0.0159	0.0168	0.0162	0.0156	0.0022	0.0022	0.002	0.0024							
liima2a640	2010	5.59E-11	5.16E-07	0.00351	0.0159	0.0215	0.0165	0.013	0.002	0.0019	0.0016	0.001							

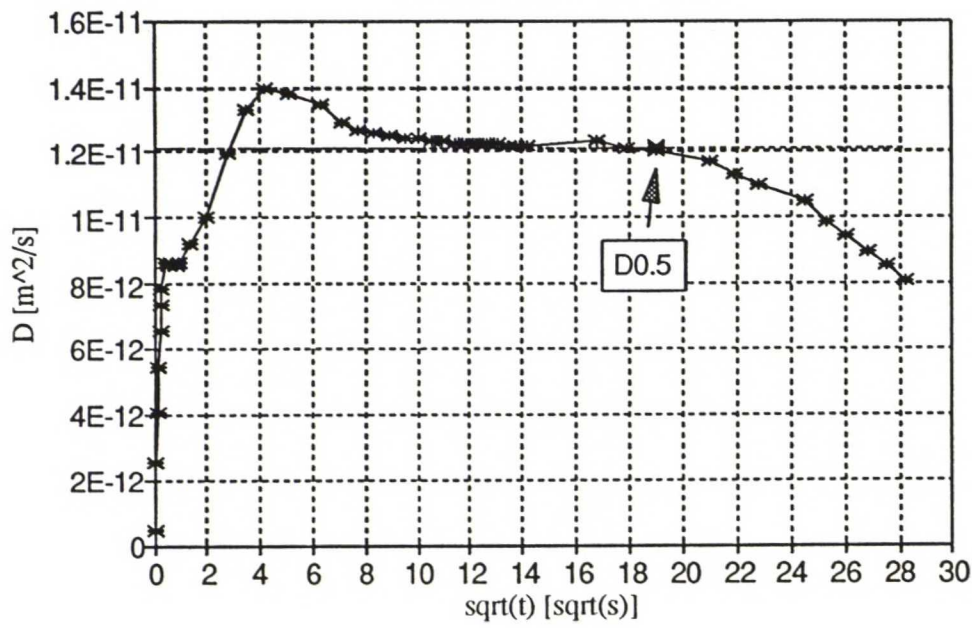


## Hetkellisten diffuusiokerrointen kuvaajat



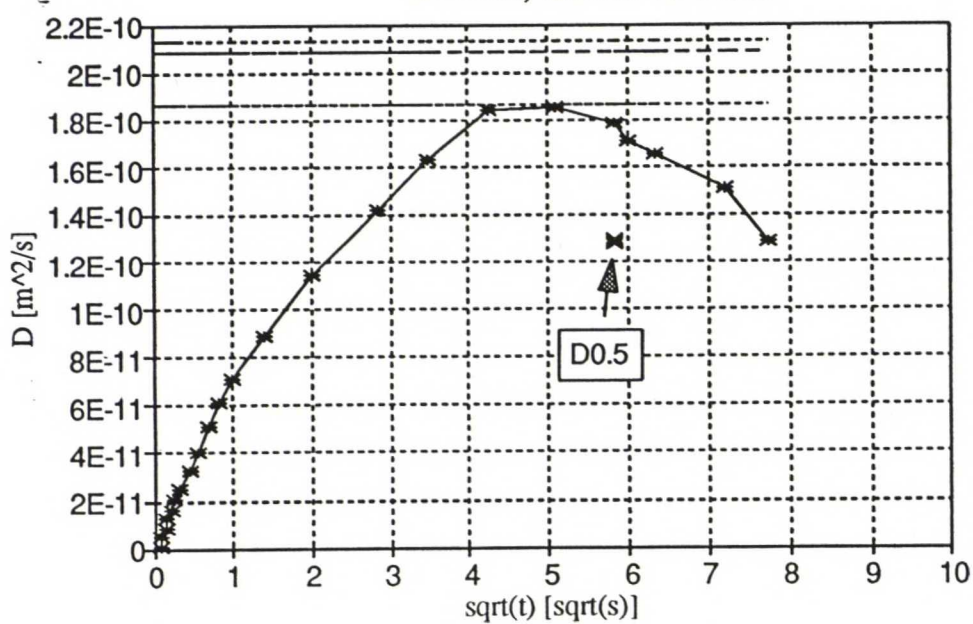
# NELIÖ

6 solua, aukko 0 nm

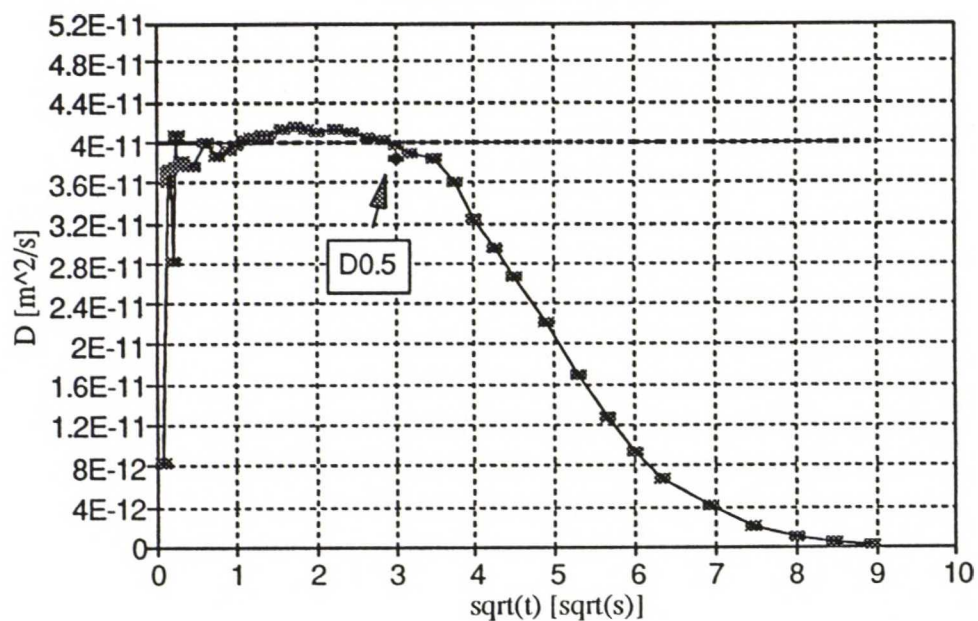


# NELIÖ

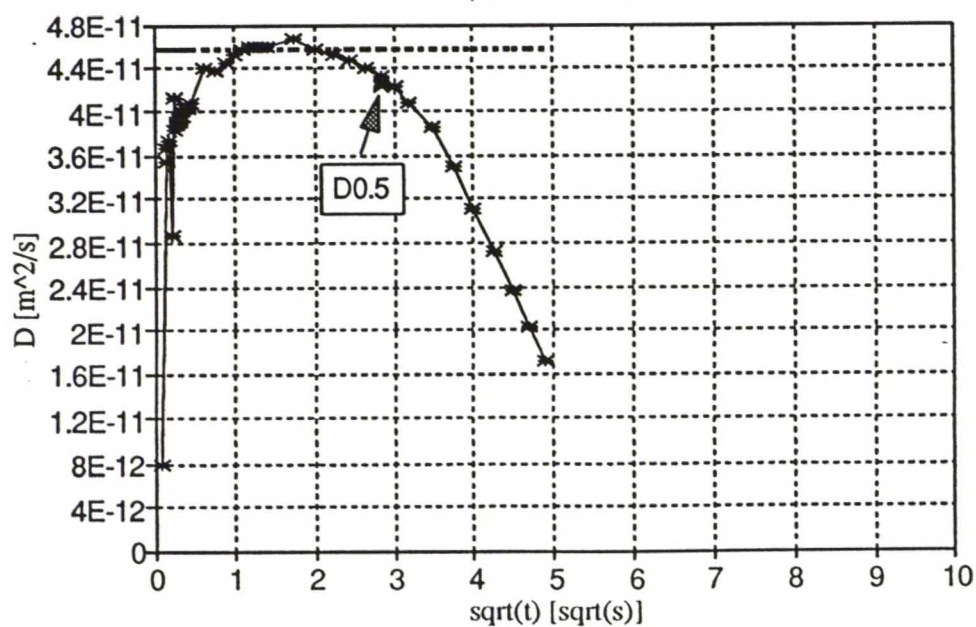
6 solua, aukko 750 nm



# KENNO 4 solua, aukko 0



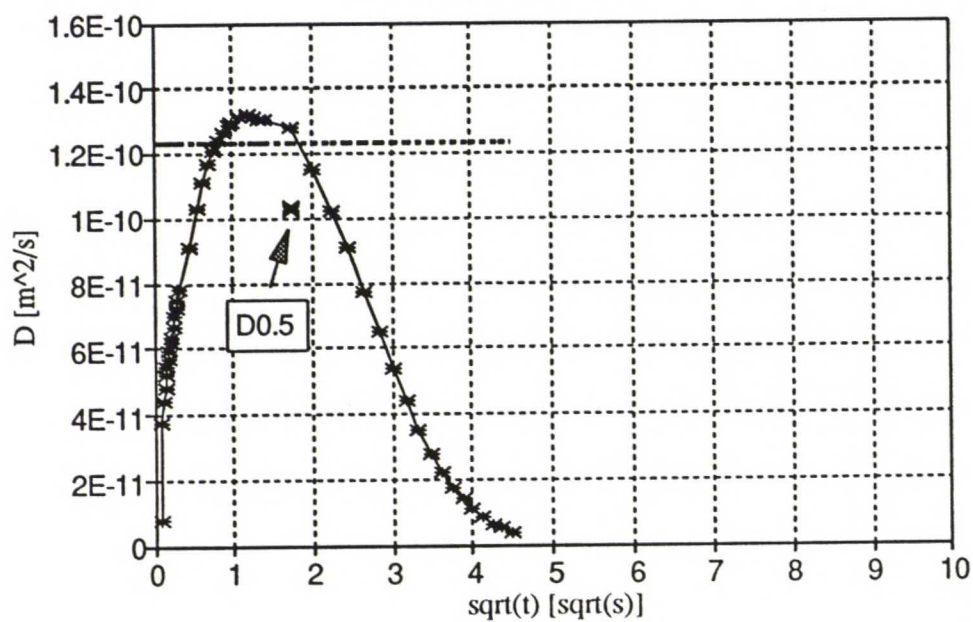
# KENNO 4 solua, aukko 18.75 nm





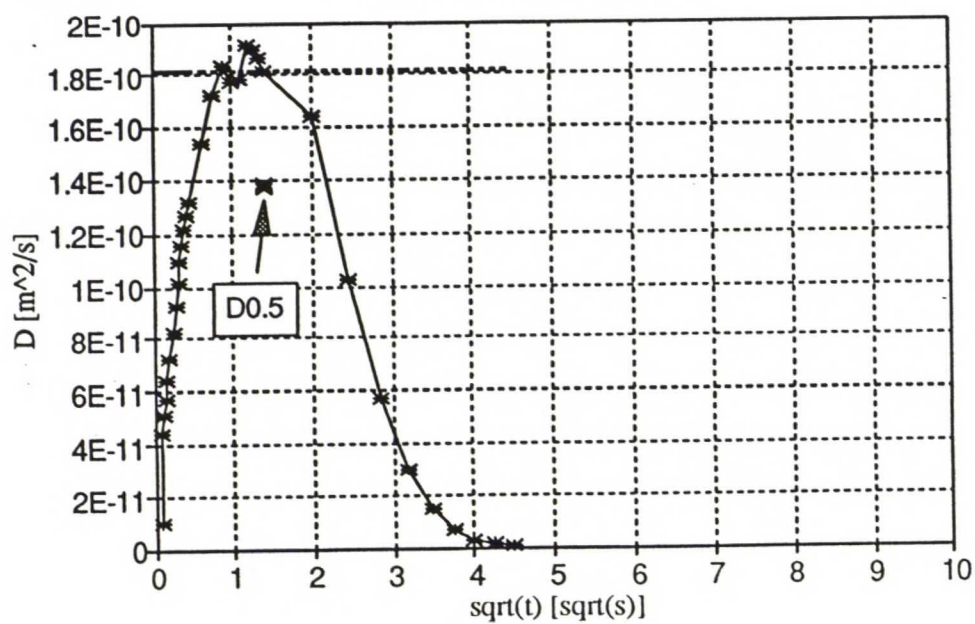
## KENNO

4 solua, aukko 320 nm

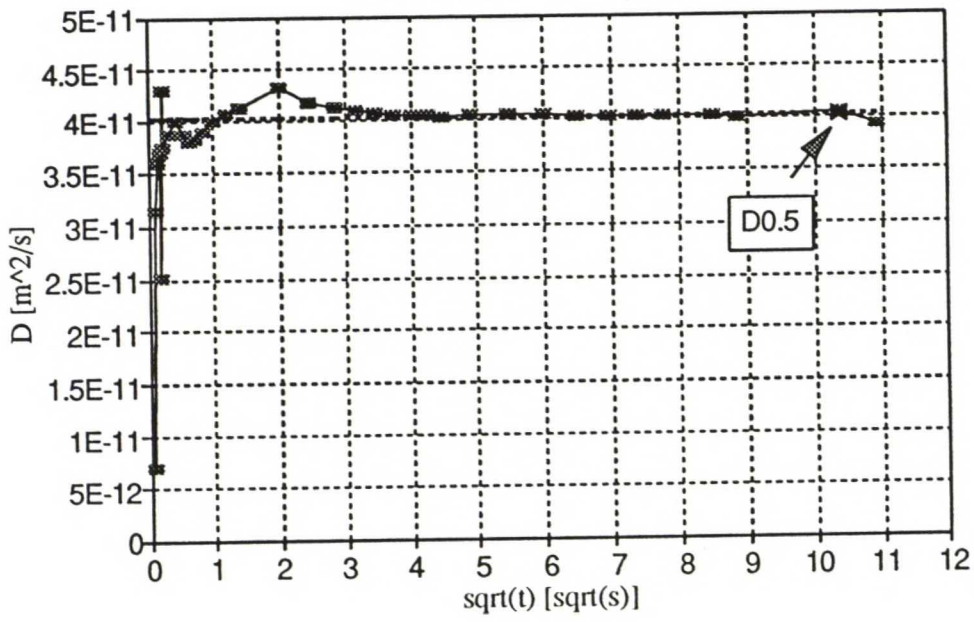


## KENNO

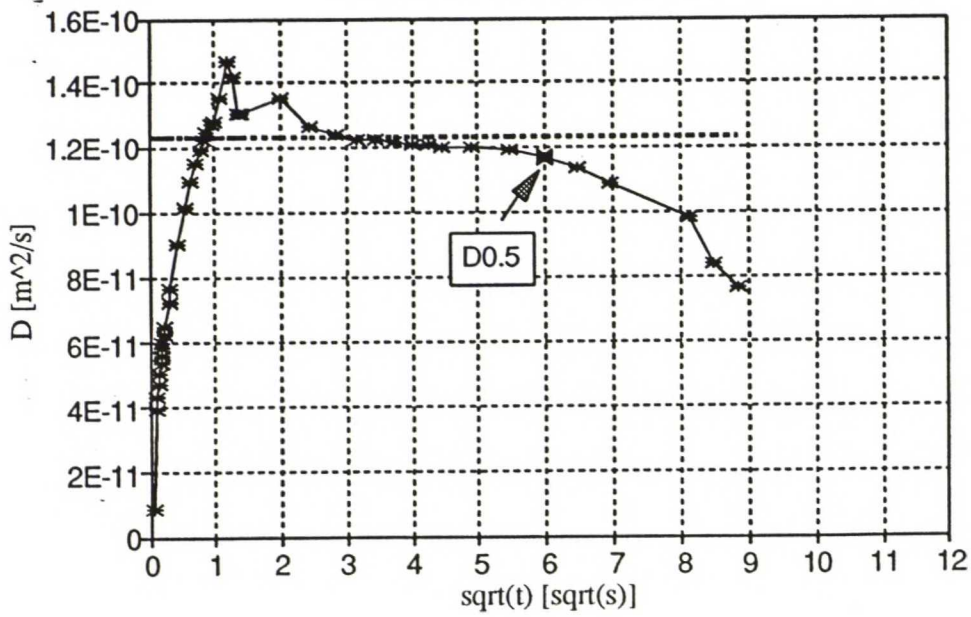
4 solua, aukko 640 nm



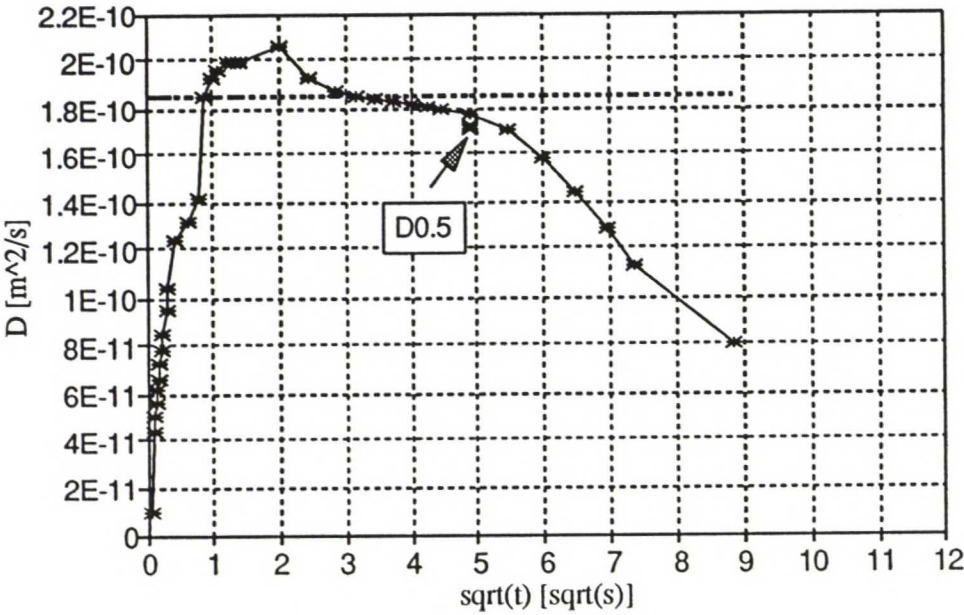
# KENNO 14 solua, aukko 0 nm



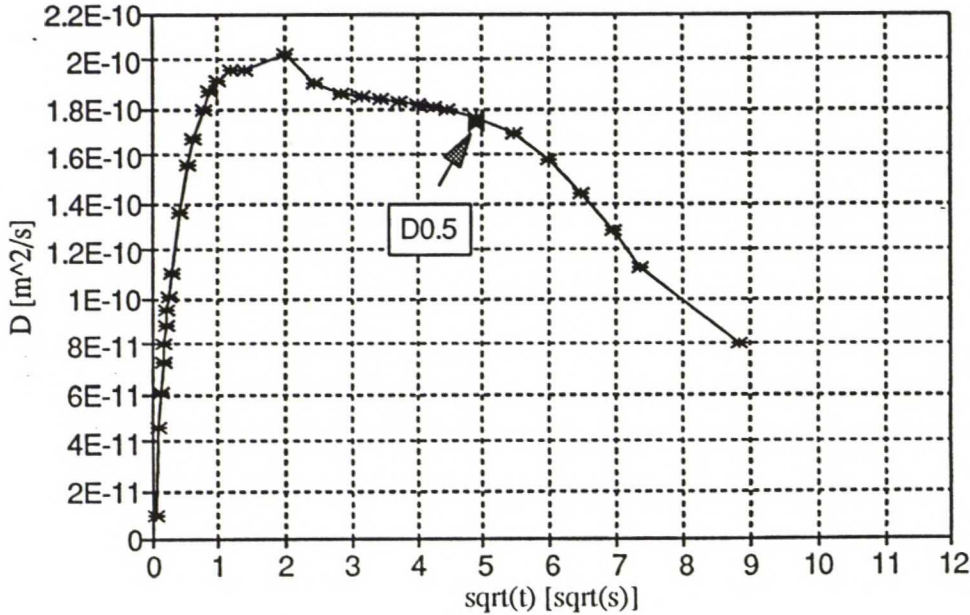
# KENNO 14 solua, aukko 320 nm



KENNO  
14 solua, aukko 640 nm



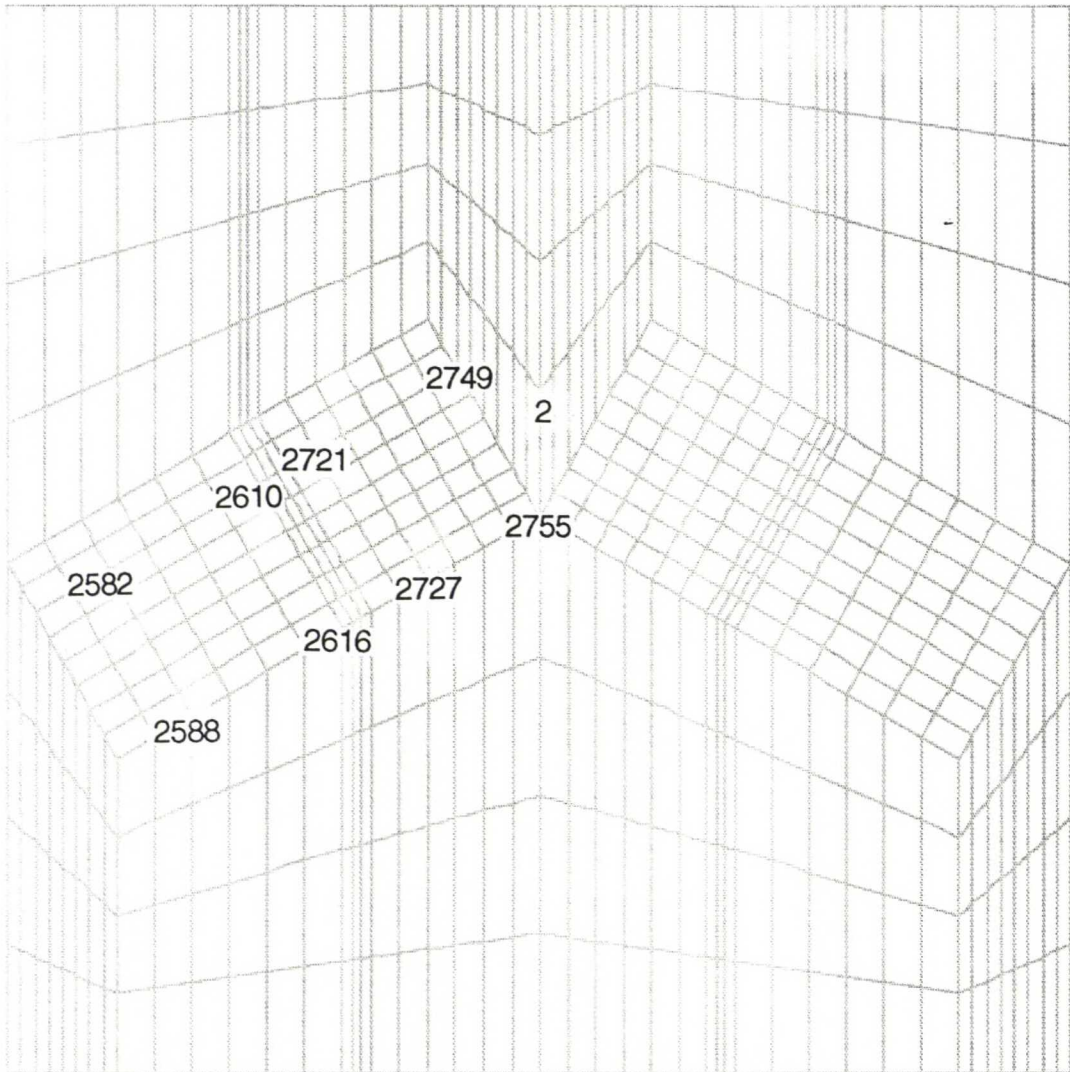
KENNO, aukon solmut yhd  
14 solua, aukko 640 nm

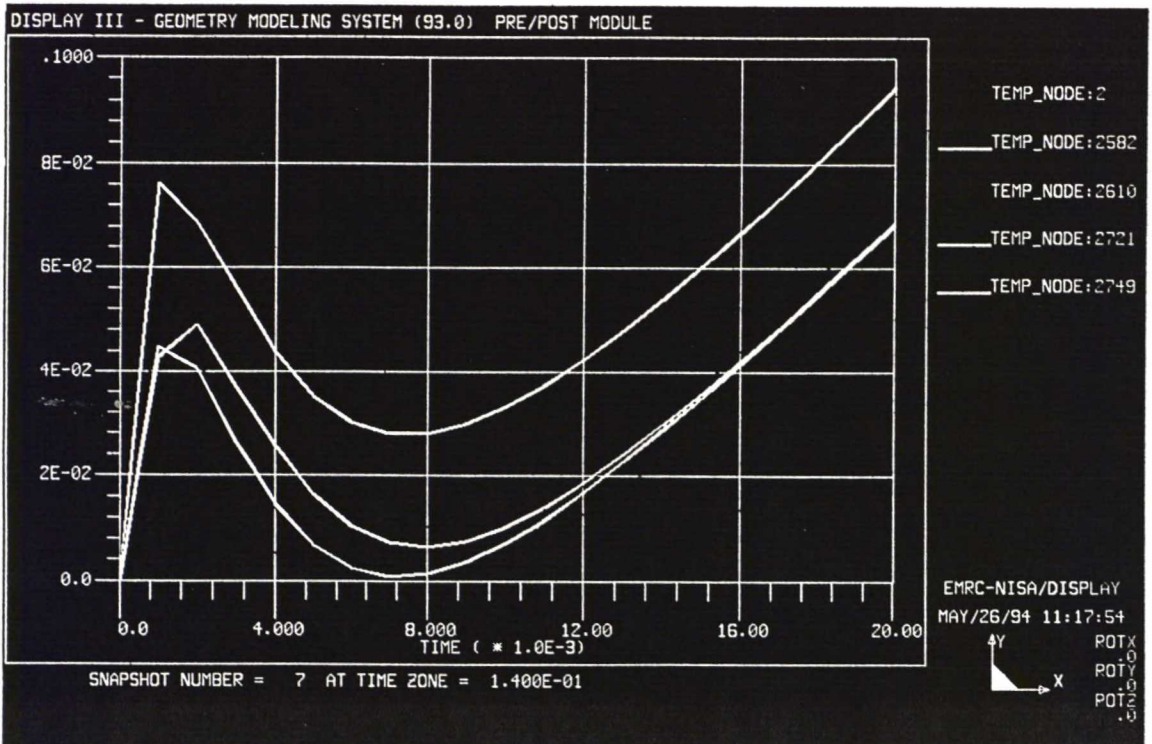
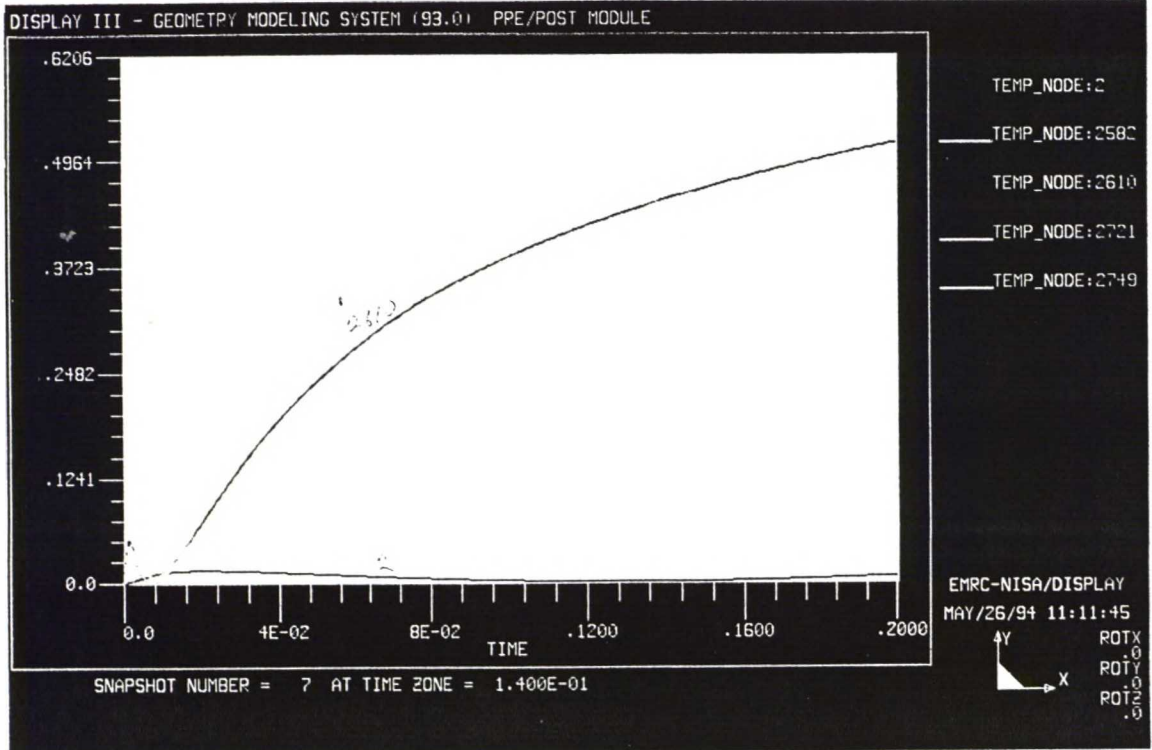


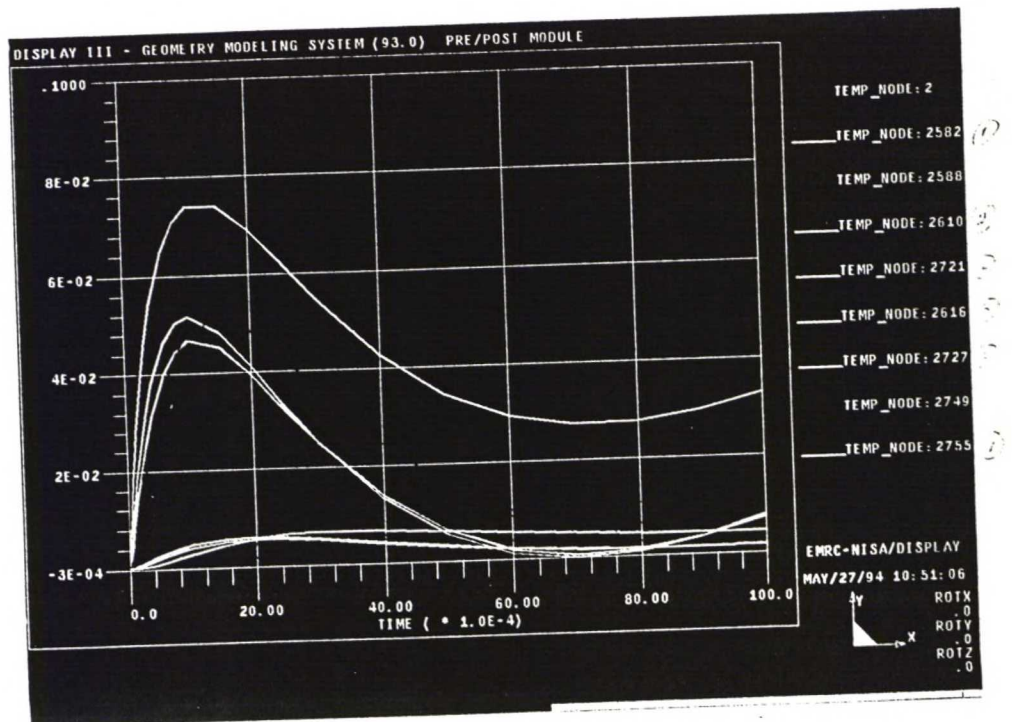
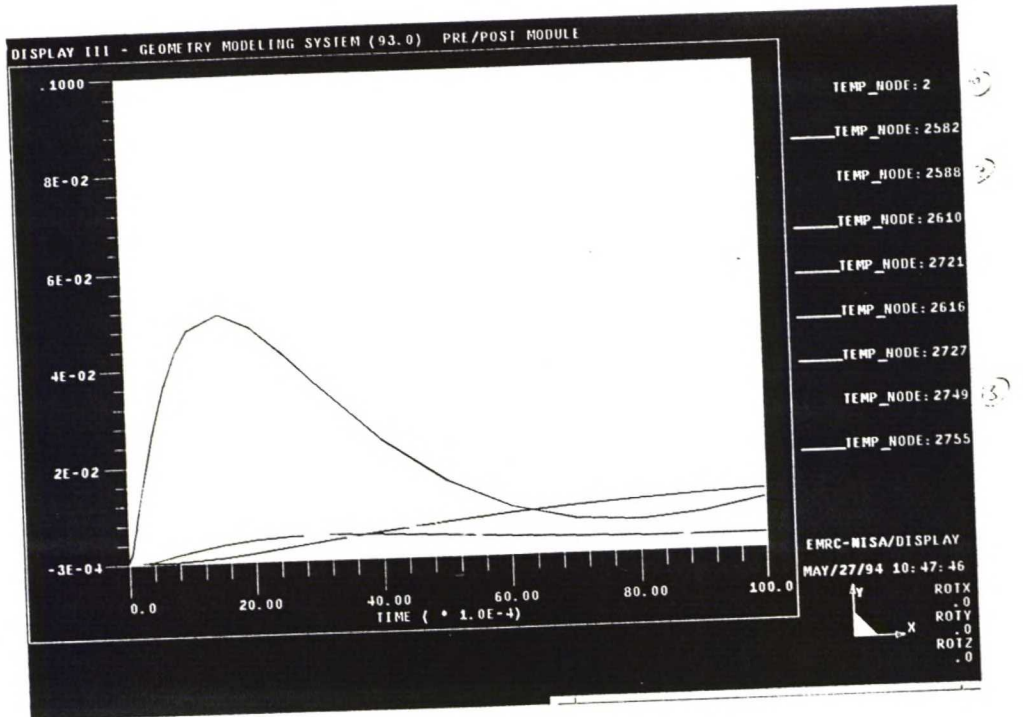


## Laskennan värähtely

Kuvista nähdään värähtelyn siirtyminen sorption alkuun kun aika-askelta on lyhennetty. Värähtelyn suuruus ei ole muuttunut.









## Tasa-arvopinta-alakuvaajat

Kosteuspitoisuuden tasa-arvopinta-alakuvaajien 30 diakuvaa on liitetty vain tekijällä olevaan työhön. Kuvien koodauksen lukuohje: kuva nro, malli, solujen lkm, huokosaukon leveys (nm). Kuvaselitteessä kerrotaan tarkastelu ajanhetki sorption alusta, vallitseva suhteellisen painonmuutoksen arvo ja hetkellisen diffuusiokertoimen arvo sekä diffuusiokertoimen mikä on laskettu alkuhetken ( $E = 0$ ,  $t = 0$ ) ja suhteellisen painonmuutoksen arvon puolivälin ajanhetken välistä ( $E = 0,5$ ). Diffuusiokertoimissa potentiaalina on puun kosteuspitoisuus.

Kuva 1.	Kenno4A0	9 s	$E = 0,5$	$D_{app} = 4e-11$	$D_{0,5} = 3,9e-11$
Kuva 2.	Kenno4A18.75	0,4 s	$E = 0,1$	$D_{app} = 4,4e-11$	$D_{0,5} = 4,2e-11$
Kuva 3.	Kenno4A18.75	3 s	$E = 0,3$	$D_{app} = 4,7e-11$	$D_{0,5} = 4,2e-11$
Kuva 4.	Kenno4A18.75	8 s	$E = 0,5$	$D_{app} = 4,3e-11$	$D_{0,5} = 4,2e-11$
Kuva 5.	Kenno4A320	1 s	$E = 0,3$	$D_{app} = 1,3e-10$	$D_{0,5} = 1e-10$
Kuva 6.	Kenno4A320	3 s	$E = 0,5$	$D_{app} = 1,2e-10$	$D_{0,5} = 1e-10$
Kuva 7.	Kenno4A640	0,4 s	$E = 0,2$	$D_{app} = 1,3e-10$	$D_{0,5} = 1,4e-10$
Kuva 8.	Kenno4A640	2 s	$E = 0,45$	$D_{app} = 1,8e-10$	$D_{0,5} = 1,4e-10$
Kuva 9.	Kenno14A320	1,1 s	$E = 0,1$	$D_{app} = 1,2e-10$	$D_{0,5} = 1,2e-10$
Kuva 10.	Kenno14A320	4 s	$E = 0,2$	$D_{app} = 1,3e-10$	$D_{0,5} = 1,2e-10$
Kuva 11.	Kenno14A640	0,2 s	$E = 0,03$	$D_{app} = 1,1e-10$	$D_{0,5} = 1,7e-10$
Kuva 12.	Kenno14A640	0,6 s	$E = 0,05$	$D_{app} = 1,4e-10$	$D_{0,5} = 1,7e-10$
Kuva 13.	Kenno14A640	0,6 s	$E = 0,05$	$D_{app} = 1,6e-10$	$D_{0,5} = 1,7e-10$
Kuva 14.	Kenno14A640	24 s	$E = 0,5$	$D_{app} = 1,7e-10$	$D_{0,5} = 1,7e-10$
Kuva 15.	Neliö6A0	360 s	$E = 0,5$	$D_{app} = 1,2e-11$	$D_{0,5} = 1,2e-11$
Kuva 16.	Neliö6A750	4 s	$E = 0,1$	$D_{app} = 1,2e-10$	$D_{0,5} = 1,3e-10$
Kuva 17.	Neliö6A750	10 s	$E = 0,2$	$D_{app} = 1,4e-10$	$D_{0,5} = 1,3e-10$
Kuva 18.	Neliö6A750	32 s	$E = 0,5$	$D_{app} = 1,8e-10$	$D_{0,5} = 1,3e-10$
Kuva 19.	EpässyA2290	0,3 s	$E = 0,05$	$D_{app} = 3,1e-10$	$D_{0,5} = 4,8e-10$
Kuva 20.	EpässyA2290	0,5 s	$E = 0,06$	$D_{app} = 3,8e-10$	$D_{0,5} = 4,8e-10$
Kuva 21.	EpässyA2290	1 s	$E = 0,1$	$D_{app} = 4,6e-10$	$D_{0,5} = 4,8e-10$
Kuva 22.	EpässyA2290	2 s	$E = 0,15$	$D_{app} = 5,7e-10$	$D_{0,5} = 4,8e-10$
Kuva 23.	EpässyA2290	6 s	$E = 0,3$	$D_{app} = 6,0e-10$	$D_{0,5} = 4,8e-10$
Kuva 24.	Liima1 (9,5)	18 s	$E = 0,3$	$D_{app} = 9,4e-11$	$D_{0,5} = 9,4e-11$
Kuva 25.	Liima1 (9,5)	44 s	$E = 0,5$	$D_{app} = 9,2e-11$	$D_{0,5} = 9,4e-11$

Kuva 26. Liima2 (55)	10 s	$E = 0,1$	$D_{app} = 1,5e-11$	$D_{0,5} = 1,8e-11$
Kuva 27. Liima2 (55)	28 s	$E = 0,15$	$D_{app} = 1,6e-11$	$D_{0,5} = 1,8e-11$
Kuva 28. Liima2 (55)	44 s	$E = 0,1$	$D_{app} = 1,7e-11$	$D_{0,5} = 1,8e-11$
Kuva 29. Liima2 (55)	85 s	$E = 0,3$	$D_{app} = 2e-11$	$D_{0,5} = 1,8e-11$
Kuva 30. Liima2 (55)	220 s	$E = 0,5$	$D_{app} = 2,1e-11$	$D_{0,5} = 1,8e-11$